

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a  
mezioborových studií



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

## **Měřicí moduly pro geofyzikální ústřednu**

## **Measurement modules for geophysical control unit**

### **Diplomová práce**

Autor:

**Bc. Richard Schreiber**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.

Konzultant diplomové práce

doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.

V Liberci 17. května 2013

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav řízení systémů a spolehlivosti

## Zadání diplomové práce

<b>Příjmení a jméno studenta, (osobní číslo - nepovinné)</b>	<b>Schreiber Richard</b> <b>M11000286</b>
<b>Studijní program</b>	<u>N2612</u> / Elektrotechnika a informatika
<b>Studijní obor</b>	<u>3906T001</u> / Mechatronika
<b>Rozsah grafických prací</b>	Dle potřeby dokumentace
<b>Rozsah průvodní zprávy</b>	cca 40-50 stran
<b>Název práce (česky)</b>	Měřicí moduly pro geologickou ústřednu
<b>Název práce (anglicky)</b>	Measurement modules for geological control unit
<b>Zásady pro vypracování BP:</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Proveďte rozbor vlastností převodníků fyzikálních veličin na současném trhu s ohledem na přesnost, odběr elektrické energie a cenu.</li><li>2. Navrhněte a realizujte hw inteligentních převodníků fyzikálních veličin do měřicí ústředny GU01 s použitím mikroprocesoru s jádrem ARM Cortex. Zaměřte se na minimalizaci příkonu.</li><li>3. S pomocí základního sw otestujte přesnost navržených převodníků.</li></ol>	
<b>Seznam odborné literatury:</b>	
<p>[1] Katalogové listy firem OMEGA, Fiedler, Turck, Comet, Jakar</p> <p>[2] Ďaďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. Vydavatelství ČVUT Praha 1999</p> <p>[3] Understanding New Developments in Data Aquisition, Measurement and Control, first edition, 2007; technická literarura firmy Keithley, Inc</p> <p>[4] Katalogové listy součástek firem Analog devices, Texas Instruments, ST</p>	
<b>Vedoucí BP/DP</b>	Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
<b>Konzultant BP/DP</b>	Doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

Datum: 17. května 2013

Podpis:

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, panu Ing. Lubomíru Slavíkovi, za odborné vedení, připomínky a za poskytnutí technického zázemí. Dále chci poděkovat doc. Milanu Hokrovi za konzultace a zapůjčení měřicích přístrojů a převodníků. Ing. Lucii Cádrové děkuji za zapůjčení měřicího systému Gryf.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá návrhem měřicích modulů pro měření chemických parametrů podzemních vod pomocí elektrochemických čidel. Moduly jsou určeny pro geofyzikální ústřednu GU100, vyvíjenou na TUL. V úvodní části práce je popsán princip činnosti vybraných elektrochemických senzorů a způsob vyhodnocení jejich signálů. Dále jsou stručně popsány možnosti různých komerčně dostupných měřicích systémů a převodníků pro tuto aplikaci a výhody vývoje vlastních modulů.

V praktické části je popsán návrh elektronických modulů, včetně realizace a ověření funkce. Moduly mají vlastní procesor a komunikace s nadřazeným systémem probíhá po digitální sběrnici. Konstrukce je rozdělena na dvě desky, jedna s procesorem a druhá pro vlastní měření včetně A/D převodu. Cílem je také použití běžných konstrukčních materiálů a výrobních technik, při zachování dostatečně velkého vnitřního odporu vstupních obvodů pro připojení čidel s velkým vlastním vnitřním odporem. Významným parametrem je i nízká spotřeba měřicích modulů. Výsledkem práce je návrh, realizace a ověření funkčnosti modulu pro měření pH, ORP a dále modulu pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku.

### **Klíčová slova:**

Chemické parametry vody, měření, vyhodnocení signálů z chemických čidel, měřicí ústředna

## **Abstract**

The diploma thesis deals with design of measurement modules for the measurement of chemical parameters of underground waters using electrochemical sensors. The principle of function of selected electrochemical sensors and the processing of their signals are described. The properties of various commercially available converters and measurement systems for this application are characterized. No standard converter fulfills all needs for an autonomous measuring system like low power consumption, possibility of connecting more sensors, small size and digital communication.

In the practical part, the design of the electronic modules is described, as well the realization and functional testing. The communication and signal processing is digital. With this setup it is possible to reach many options for processing the signal from sensors. The actual measuring module consists of a processor board, which is identical for all sensors. Analog signal processing and A/D conversion is on a separate board, each for one sensor type. The aim was also to reach very high input resistances using standard PCB materials. The result is the design, realization and testing of a module for pH, ORP and also dissolved oxygen measurement.

### **Key words:**

Chemical water parameters, measurement, evaluation of signals from chemical probes, measurement control unit.

# Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Obsah .....	7
Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	12
Úvod.....	13
1. Základy měření vybraných fyzikálních veličin .....	15
1.1 Měření koncentrace iontů.....	15
1.1.1 Vodíková elektroda.....	16
1.1.2 Skleněná elektroda .....	17
1.1.3 Antimonová elektroda.....	18
1.1.4 Referentní elektrody .....	18
1.1.5 Chloridostříbrná elektroda .....	19
1.1.6 Kalomelová elektroda .....	19
1.1.7 Měření pH ve vodných roztocích.....	20
1.1.8 Měření koncentrace jiných iontů v roztoku .....	20
1.2 Měření oxidačně-redukčního potenciálu.....	20
1.3 Měření koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vodě .....	21
1.3.1 Optická metoda .....	23
1.3.2 Elektrochemická metoda.....	23
1.3.3 Konstrukce Clarkova čidla.....	24
1.3.4 Interpretace naměřených hodnot.....	26
1.4 Měření konduktivity .....	27
2. Požadavky na zpracování signálu z elektrochemických čidel.....	29
2.1 Zpracování signálu z elektrod pro měření koncentrace iontů a oxidačně-redukčního potenciálu .....	29
2.2 Zpracování signálu z Clarkova čidla (koncentrace rozpuštěného kyslíku).....	33
2.3 Porovnání dostupných převodníků a měřicích přístrojů na trhu .....	34



2.3.1	Přístroje pro měření napětí s velkým vstupním odporem (pH, ORP, ISE)...	34
2.3.2	Přístroje pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku .....	36
2.3.3	Přístroje pro měření vodivosti – konduktrometry .....	37
3.	Návrh modulů pro měřicí ústřednu.....	39
3.1	Modul milivoltmetru s vysokým vstupním odporem.....	39
3.1.1	A/D Převodník a multiplexer .....	40
3.1.2	Zdroj referenčního napětí.....	41
3.1.3	Obvod pro měření teploty .....	41
3.1.4	Vstupní obvod s vysokou impedancí .....	43
3.2	Modul pro připojení Clarkova čidla (měření koncentrace kyslíku) .....	46
3.2.1	AD převodník s multiplexerem, obvody referenčního napětí.....	46
3.2.2	Zdroj polarizačního napětí pro Clarkovo čidlo .....	47
3.2.3	Převodník proud/napětí pro Clarkovo čidlo.....	48
3.2.4	Snímač absolutního tlaku vzduchu .....	50
3.2.5	Obvod měření teploty .....	51
3.3	Základní modul – procesorová deska.....	51
3.3.1	Procesor a pomocné obvody .....	51
3.3.2	Galvanické oddělení .....	52
3.4	Modul konduktometru – návrh zapojení .....	53
4.	Software.....	55
4.1	SW výbava .....	55
4.2	Ovládání .....	55
4.2.1	Příklad komunikace .....	56
5.	Realizace a ověření funkce .....	57
5.1	Modul pro měření napětí pro pH, ORP, ISE sondy .....	57
	Spotřeba energie .....	60
5.2	Modul pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku .....	60
	Závěr .....	62
	Seznam použité literatury .....	64
	Obsah přiloženého CD.....	66
	Příloha A – Motivy desek s plošnými spoji .....	67

Příloha B – Osazovací plánky.....	69
Příloha C – Fotografie.....	71
Příloha D – Kalibrační charakteristiky čidel.....	73

## Seznam obrázků

Obr. 1: Skleněná elektroda.....	18
Obr. 2: Stříbrochloridová elektroda .....	19
Obr. 3: Kombinovaná elektroda.....	20
Obr. 4: Zapojení pro ampérometrické měření .....	23
Obr. 5: Zjednodušené zapojení pro ampérometrické měření.....	24
Obr. 6: Zapojení s potenciostatem a tříelektrodovou sondou .....	24
Obr. 7: Clarkovo čidlo rozpuštěného kyslíku .....	24
Obr. 8: Detail membrány .....	25
Obr. 9 Skutečné provedení čidla.....	25
Obr. 10: Náhradní obvod elektrodového snímače .....	28
Obr. 11: Měření pH – významné odpory[4] .....	29
Obr. 12: Bez stínění .....	30
Obr. 13: Aktivní stínění .....	31
Obr. 14: Nevhodné spojení kombinovaných elektrod .....	32
Obr. 15: Použití samostatných poločlánků .....	33
Obr. 16: Odpojení nepotřebných elektrod .....	33
Obr. 17: Blokové schéma.....	39
Obr. 18: Obvod A/D převodníku .....	40
Obr. 19: Reference .....	41
Obr. 20: Měření teploty .....	42
Obr. 21: Spínání elektrod a dekodér .....	43
Obr. 22: Vstupní zesilovač.....	44
Obr. 23: Obrazec spoje vstupního obvodu.....	45
Obr. 24: Obvod A/D převodníku .....	46
Obr. 25: Zdroj referenčního napětí .....	47
Obr. 26: Zdroj polarizačního napětí.....	47
Obr. 27: Pomocný zdroj polarizačního napětí .....	48
Obr. 28: Nanoampérmetr .....	49
Obr. 29: Čidlo tlaku vzduchu.....	51
Obr. 30 Konduktometr – přepínání rozsahů .....	53
Obr. 31 Celovlnný usměrňovač .....	54

Obr. 32: Určení vstupního odporu .....	58
Obr. 33 Ověření plastové pH sondy po 7 dnech od kalibrace .....	59
Obr. 34 Odezva kyslíkové sondy .....	61

## Seznam tabulek

Tab. 1: Přístroje pro měření pH .....	36
Tab. 2: Přístroje pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku.....	37
Tab. 3: Konduktometry.....	38
Tab. 4: Základní materiály pro DPS .....	45
Tab. 5: Vstupní parametry při $R=1\text{G}\Omega$ .....	58
Tab. 6: Spotřeba modulu milivoltmetru.....	60
Tab. 7: Měření koncentrace kyslíku nebo teploty.....	61
Tab. 8: Měření atmosférického tlaku .....	61

## Úvod

Pro účely matematického modelování geologických jevů je nutno měřit různé fyzikální veličiny, jako například mechanické posunutí, teploty a vlhkosti podzemních prostor, průtoky a další chemické parametry podzemních vod, případně jiné další fyzikální veličiny. Realizace takovýchto měření má svá specifika. Místa měření mohou být od sebe značně vzdálena, takže je výhodnější decentralizované uspořádání s několika měřicími ústřednami, které jsou navzájem propojeny pomocí digitální sběrnice, případně pracují autonomně. Autonomní dlouhodobý sběr dat v místech bez napájení klade velké nároky na maximálně úsporné řešení elektroniky, z důvodu omezené kapacity napájecího akumulátoru. Varianta s propojením jednotlivých uzlů pomocí sběrnice umožňuje napájení po kabelu, je možné i on-line vyčítání dat, ale nehodí se pro všechny aplikace. Pro tato měření byla vyvinuta geologická měřicí ústředna „GU100“, která by měla splňovat požadavky kladené na tento druh zařízení.

Z důvodu silné variability měřených veličin byla zvolena modulární koncepce. Převážná část snímačů mechanických veličin používá standardní napěťový analogový výstupní signál 0-10 V, méně výhodněji pak proudovou smyčku 4-20 mA. Nevýhoda spočívá ve větší spotřebě energie. Snímače, mající jinou výstupní veličinu, je pak možno připojit pomocí převodníků na standardní analogový signál, nebo pomocí speciálních vstupních modulů, které je možno do ústředny umístit až do počtu 4 kusy na jednu ústřednu. Pro ústřednu byly již vyvinuty moduly pro připojení analogových signálů 0-10 V a 4-20 mA, modul pro odporové snímače teploty a modul pro zpracování frekvenčních signálů. Byl však požadavek i na měření chemických parametrů vody, jako například pH, oxidačně-redukční potenciál (ORP) či koncentrace rozpuštěného kyslíku. Snímače těchto veličin je možno připojit přes převodníky na standardní signál, je však cenově výhodnější použít měřicí moduly určené pro přímé připojení senzorů chemických veličin.

Zpracování signálů z těchto čidel klade vysoké nároky na návrh elektroniky, například u měření napětí z pH sondy je požadován velmi vysoký vstupní odpor měřicího zesilovače. Také je nutné galvanické oddělení jednotlivých snímačů z důvodu možného vzájemného ovlivnění čidel umístěných ve stejné vodě a teplotní kompenzace naměřených hodnot. V následující práci bude popsán návrh a konstrukce měřicího modulu pro měření pH, redoxního potenciálu – modul milivoltmetru a dále modul pro

připojení čidla koncentrace rozpuštěného kyslíku. Je navrženo i základní schéma pro měření konduktivity. Dále bude popsán základní princip měření vybraných veličin a stručný přehled přístrojů, případně převodníků dostupných na trhu, které byly dosud pro měření používány.

# 1. Základy měření vybraných fyzikálních veličin

## 1.1 Měření koncentrace iontů

Mezi tato měření spadá především velmi často používané měření hodnoty pH – koncentrace vodíkových iontů v roztoku. Je ale možné měřit i koncentrace jiných iontů, pokud se použije vhodná iontově selektivní membrána. Všechna měření této kategorie spadají pod potenciometrická měření, výsledným výstupním signálem z elektrody je napětí úměrné měřené veličině. Sondy se chovají jako zdroj napětí s velmi velkým vnitřním odporem.

Elektromotorické napětí článku  $U$  je definované jako rozdíl potenciálů měrné a referenční elektrody.

$$U = E_m - E_{ref} \quad (1)$$

Na fázovém rozhraní elektroda-elektrolyt vzniká elektrodový potenciál  $E$ . Rovnovážný elektrodový potenciál, když na elektrodě probíhá elektrochemická reakce podle rovnice:



lze v závislosti na aktivitách reagujících látek vyjádřit Nernstovou rovnicí:

$$E = E^0 - \frac{RT}{zF} \ln \frac{a^c(C) \cdot a^d(D)}{a^a(A) \cdot a^b(B)}, \quad (3)$$

kde  $E^0$  je standardní elektrodový potenciál,

$R$  je plynová konstanta,

$T$  je absolutní teplota v Kelvinech,

$F$  je Faradayova konstanta,

$z$  je počet elektronů vyměněných při reakci,

$a(x)$  jsou aktivity jednotlivých složek umocněné na odpovídající stechiometrické koeficienty, v případě zředěných roztoků se nahradí rovnovážnými koncentracemi.

Tento vztah platí pro elektrody, které neobsahují membránu, jako například elektrody kovové.

Pokud elektroda obsahuje membránu, kterou může prostupovat pouze jediný ion, jedná se o iontově selektivní elektrodu (ISE). Dojde ke vzniku membránového potenciálu, který je rozdílem potenciálů na obou stranách membrány. Elektroda je naplněna roztokem s konstantní aktivitou iontu, který může difundovat membránou.



V roztoku je ponořena vnitřní referenční elektroda, která slouží ke spojení s voltmetrem. Potenciál ISE je popsán Nicolsky-Eisenmanovou rovnicí:

$$E = K + \frac{RT}{z_X F} \ln \left( [X] + \sum_i k_i [i]^{\frac{z_X}{z_i}} \right), \quad (4)$$

kde K je konstanta elektrody, která se určuje experimentálně,

$z_X$  je nábojové číslo iontu X (pro  $H^+$   $z_X = +1$ )

X je ion, který selektivně difunduje membránou,

i je interferující ion,

$z_i$  je nábojové číslo interferujícího iontu a

$k_i$  je koeficient selektivity.

Hodnota pH je definovaná jako

$$pH = -\log a_{H^+}, \quad (5)$$

kde  $a_{H^+}$  je aktivita vodíkových iontů. Ve zředěných vodných roztocích nahradíme aktivitu vodíkových iontů jejich molární koncentrací a dostaneme rovnici ve tvaru:

$$pH = -\log c_{H^+} \quad (6)$$

Obdobně platí pro hydroxidové ionty:

$$pOH = -\log c_{OH^-} \quad (7)$$

Ve vodných roztocích dále platí:

$$\begin{aligned} [H^+].[OH^-] &= 10^{-14} \\ pH + pOH &= 14 \end{aligned} \quad (8)$$

Pro měření pH je možno použít několik typů měrných elektrod (poločlánků). Jeden pól voltmetru je spojen s měrnou elektrodou, druhý pól je připojen na referenční (srovnávací) elektrodu. [1]

### 1.1.1 Vodíková elektroda

Je základní měrná elektroda pro měření pH. Skládá se z platinové elektrody (plíšku) potažené vrstvou platinové černi, která je ponořena v roztoku nasyceném vodíkem. Platinová čern působí jako katalyzátor pro disociaci molekulárního vodíku na atomární, ten je v rovnováze s vodíkovými ionty:



Rovnovážný potenciál určíme ze vztahu (3):

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{H_2}}{a_{H^+}^2}, \quad (10)$$

kde  $E^0$  je standardní potenciál vodíkové elektrody (nulový za všech teplot, stanoveno konvencí),

$aH_2$  je aktivita vodíku a

$aH^+$  je aktivita vodíkových iontů.

Aktivitu vodíku lze nahradit poměrem parciálních tlaků:

$$aH_2 = \frac{pH_2}{p^0}, \quad (11)$$

kde  $pH_2$  je parciální tlak vodíku, kterým je syčen roztok v elektrodě a

$p^0$  je tlak čisté složky, ve standardním stavu 101,325 kPa.

Po úpravě dostaneme výraz pro výpočet potenciálu vodíkové elektrody:

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{aH^+}{pH_2 / p^0}, \quad (12)$$

Pokud platí  $pH_2 = p^0$  a  $aH^+ = 1$ , označujeme elektrodu jako standardní vodíkovou elektrodu. Slouží pro vzájemné porovnávání potenciálů ostatních elektrod. V praxi se vodíková elektroda pro měření nepoužívá pro nepraktičnost.

### 1.1.2 Skleněná elektroda

Je membránová iontově selektivní elektroda pro vodíkové ionty. Je tvořena slabou membránou ve tvaru kulovité baňky ze speciálního skla. Elektroda je naplněna pufrem o konstantním pH, ve kterém je ponořena vnitřní referentní elektroda. Nejčastěji se jedná o stříbrný drát pokrytý vrstvou chloridu stříbrného (chloridostříbrná elektroda). Působením vody dochází k hydrolýze skla a k vzájemné výměně sodíkových iontů ze skla za vodíkové ionty z měřeného roztoku.

Pokud není elektroda citlivá na aktivitu sodíkových iontů, lze potenciál daný (4) vyjádřit zjednodušeně jako:

$$E = K + \frac{RT}{F} \ln aH^+ = K - 2,303 \frac{RT}{F} pH, \quad (13)$$

kde  $K$  je konstanta elektrody,

$R$  je plynová konstanta,

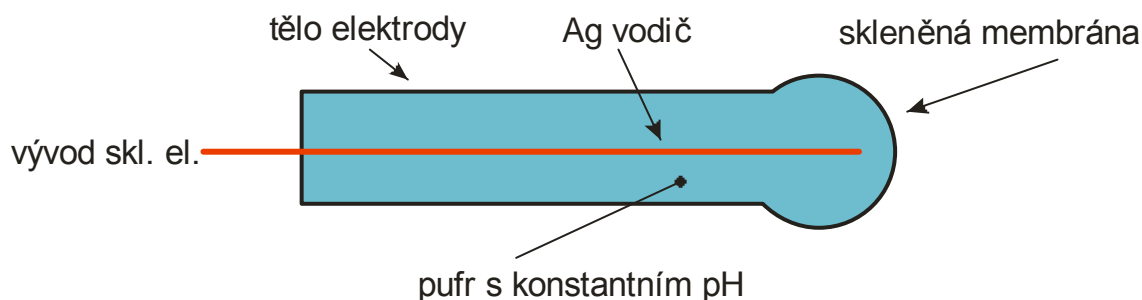
$T$  je absolutní teplota

$F$  je Faradayova konstanta a

$aH^+$  je aktivita vodíkových iontů.

Měření aktivity iontů  $H^+$ , resp. měření pH pomocí skleněné elektrody je zatíženo v silně alkalických ( $pH > 12$ ) roztocích alkalickou chybou, kdy naměřená hodnota je menší než teoretická. Kyselá chyba ( $pH < 1$ ) se uplatňuje v silně kyselých roztocích, kde naměřené pH je větší než teoretické.

Hodnoty potenciálů i konstanta elektrody se časem může měnit, kompenzace těchto vlivů se provádí častější kalibrací. Měřená hodnota by měla ležet mezi krajními hodnotami kalibračních roztoků.

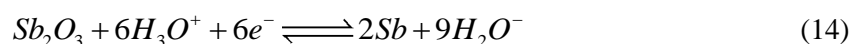


Obr. 1: Skleněná elektroda

### 1.1.3 Antimonová elektroda

Patří mezi metalicko-oxidové elektrody. Jedná se o elektrody z kovů, které se nerozpouštějí ve zředěných kyselinách ani zásadách a jejich oxidy jsou málo rozpustné. V tomto případě je tvořena tyčinkou z čistého antimonu, která je pokryta vrstvou oxidu.

Probíhá reakce ve tvaru:



Potenciál je:

$$E = E_{Sb}^0 + \frac{RT}{F} \ln aH^+ = E_{Sb}^0 - 2,303 \frac{RT}{F} pH \quad (15)$$

Dle tohoto vztahu by měl být potenciál lineárně závislý na pH. Ve skutečnosti to platí jen omezeně a křivka závislosti se skládá z více lineárních úseků o různých směrnících. V praxi se používá pro měření pH v rozmezí 2,5 - 9 a 10 - 13. Potenciál je závislý na přítomnosti kyslíku v roztoku.

### 1.1.4 Referentní elektrody

Druhou částí elektrochemického článku nutnou k uzavření obvodu je referentní elektroda. Jsou na ni kladeny tyto požadavky: musí se chovat podle Nernstovy rovnice, potenciál musí být časově stálý, co nejméně závislý na teplotě a koncentraci

stanovované složky. V praxi se používají především elektrod chloridostříbrné nebo kalomelové. Dále existuje elektroda merkurosulfátová.

### 1.1.5 Chloridostříbrná elektroda

Je tvořena stříbrným drátem, který je pokryt vrstvou chloridu stříbrného, vše je ponořeno v roztoku chloridu draselného, nasyceného chloridem stříbrným. V praxi se tato elektroda používá nejčastěji. Roztok KCl bývá o koncentraci 1 nebo 3 molární, případně nasycený (ten se používá u elektrod se zahuštěnou gelovou náplní).

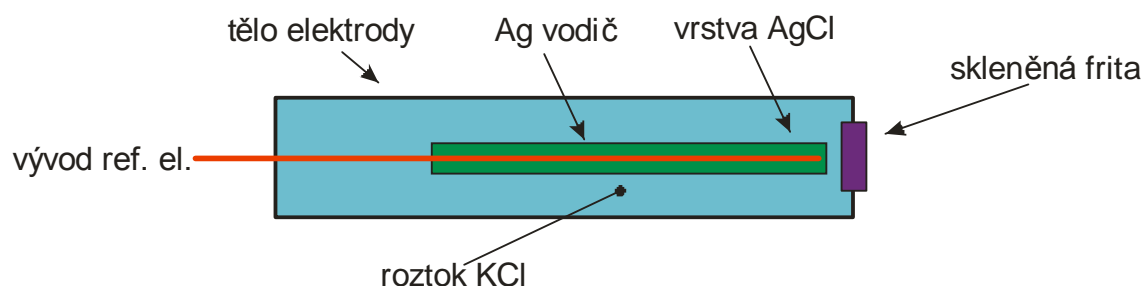
Elektrodová reakce:



a potenciál:

$$E = E^0 - \frac{RT}{F} \ln a_{Cl^-}, \quad (17)$$

Pro elektrody s náplní roztoku KCl je potenciál kolem +200 mV v závislosti na teplotě a koncentraci elektrolytu. [14]

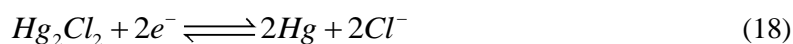


Obr. 2: Stříbrochloridová elektroda

### 1.1.6 Kalomelová elektroda

Skládá se ze rtuťové elektrody převrstvené suspenzí chloridu rtuťného (kalomelu) v roztoku KCl.

Elektrodová reakce:



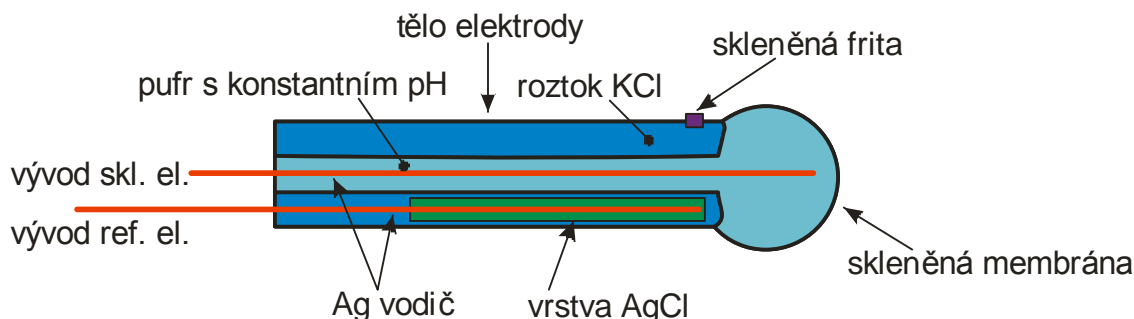
a potenciál:

$$E = E^0 - \frac{RT}{F} \ln a_{Cl^-}, \quad (19)$$

Pro elektrody s náplní roztoku KCl je potenciál kolem +268 mV.

### 1.1.7 Měření pH ve vodných roztocích

Pro měření se obvykle používá kombinace skleněné měřicí elektrody a chloridostříbrné referentní elektrody, které jsou ponořeny do měřeného roztoku. Často jsou obě tyto elektrody spojeny a tvoří tzv. kombinovanou elektrodu.



Obr. 3: Kombinovaná elektroda

Z rovnic (1), (13) a (17) dostaneme lineární vztah mezi měřeným elektromotorickým napětím a hodnotou pH:

$$U = E_m - E_{ref} = k - 2,303 \frac{RT}{F} pH - E_{ref} = K - S \cdot pH, \quad (20)$$

Parametry lineární závislosti  $K$  – offset a směrnici (strmost)  $S$  je nutno určit experimentálně, provedením kalibrace pomocí standardních roztoků o definovaném pH, tzv. pufrů. [1], [3], [6]

### 1.1.8 Měření koncentrace jiných iontů v roztoku

Používá kombinaci referentní a speciální iontově selektivní elektrody pro dané ionty. Je nutno vzít v úvahu, že selektivita není úplná a může dojít k ovlivnění měření za přítomnosti dalších iontů. Iontově selektivní membrána může být vyrobena ze skla, nerozpustných krystalických solí, případně z polymerů.

## 1.2 Měření oxidačně-redukčního potenciálu

Hodnota oxidačně-redukčního potenciálu (ORP) je významným parametrem vody, resp. vodného roztoku. Udává povahu látek v roztoku, která může být redukční (záporné hodnoty) nebo oxidační (kladné hodnoty). Měří se v mV, vztaženo k standardní vodíkové elektrodě. K naměřené hodnotě napětí je nutno přičíst ještě potenciál referentní elektrody. [15]

$$\begin{aligned} ORP_H &= ORP_M + E_{ref} \\ (E_H &= E_M + E_{ref}) \end{aligned}, \quad (21)$$

kde  $ORP_H(E_H)$  je oxidačně-redukční potenciál vzorku, proti standardní vodíkové elektrodě v mV,

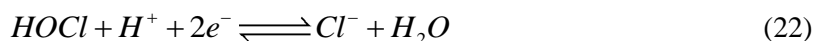
$ORP_M(E_M)$  je oxidačně-redukční potenciál vzorku, proti referentní elektrodě v mV a

$E_{ref}$  je potenciál referentní elektrody oproti standardní vodíkové elektrodě v mV.

Pro měření oxidačně-redukčního potenciálu se používá jednoduchá kovová elektroda, s platinovým nebo zlatým plíškem. Referentní elektroda je obvykle argentchloridová, běžná jsou kombinovaná provedení sondy.

Pokud voda například obsahuje rozpuštěný chlor, který reakcí s vodou vytváří kyselinu chlornou, oxidační činidlo, lze jednoduše určit oxidační potenciál.

Pro vyjádření lze opět použít elektrodovou reakci:



a Nernstovu rovnici ve tvaru:

$$E = E^0 - 59,16 \ln \frac{a_{Cl^-}}{a_{HOCl} \cdot a_{H^+}}, \quad (23)$$

kde  $E^0$  je v tomto případě 1490 mV. Vlastní potenciál je poté závislý na aktivitě iontů vodíkových, chloridových a aktivitě kyseliny chlorné. Závislost vztahu na koncentraci iontů  $H^+$  znamená, že potenciál se mění se změnou pH. [5]

### 1.3 Měření koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vodě

Plyny se do jisté míry mohou rozpouštět v kapalinách. Dochází ke vzniku rovnováhy mezi kapalinou a plynem, za předpokladu, že teplota soustavy je vyšší než kritická teplota plynu. Například pro kyslík ( $T_k = -183\text{ °C}$ ) a vodu ( $T_k = 374\text{ °C}$ ) je toto splněno. Rozpustnost plynů závisí na plynu, kapalině, její teplotě a parciálnímu tlaku plynu nad hladinou kapaliny a je vyjádřena Henryho zákonem. Tento vztah platí pouze pro plyny nereagující s kapalinou.

$$p = K_H x \quad (24)$$

Kde  $p$  je parciální tlak plynné fáze nad kapalinou,  $x$  je molární zlomek této plynné fáze v kapalině a  $K_H$  je Henryho konstanta charakteristická pro dané látky a teplotu. Rozměr této konstanty je tlak.

V praxi se využívá i jiných vztahů, kdy může Henryho konstanta mít i jiný rozměr, případně být i bezrozměrná. Je možný přepočet mezi těmito konstantami. Výhodné je např. použití vztahu:

$$p = K_{Hc} c, \quad (25)$$

kde  $c$  [mol/l] je molární koncentrace plynu rozpuštěného v kapalině. Pro hmotnostní koncentraci lze vztah upravit na:

$$c_m = \frac{p}{K_{Hc}} M_A, \quad (26)$$

kde  $M_A$  je molární hmotnost plynu a  $c_m$  pak bude přímo hmotnost rozpuštěného plynu v litru kapaliny.  $K_{Hc}$  je Henryho konstanta, udávající vztah mezi koncentrací rozpuštěného plynu a jeho parciálním tlakem. [2]

Pro čistý kyslík rozpuštěný ve vodě při teplotě 25 °C a standardním tlaku 100 kPa lze určit maximální nasycení vody kyslíkem:

$$c_m = \frac{p}{K_{Hc}} M_A = \frac{100 \cdot 10^3}{7,5915 \cdot 10^7} \cdot 31,9988 = 0,042 \text{ g/l} \quad (27)$$

Litr vody tedy dokáže rozpustit 42 mg kyslíku.

Pro vzduch je situace složitější, protože se jedná o směs plynů. Pro zjednodušení budeme uvažovat 21 % kyslíku a 79 % dusíku. Součet parciálních tlaků podle Daltonova zákona bude právě 100 kPa, přičemž parciální tlak kyslíku bude 21 kPa a dusíku 79 kPa.

Voda nasycená vzduchem tedy bude obsahovat:

$$\text{Kyslík v koncentraci } c_m = \frac{p}{K_{Hc}} M_A = \frac{21 \cdot 10^3}{7,5915 \cdot 10^7} \cdot 31,9988 = 0,0089 \text{ g/l a}$$

$$\text{dusík v koncentraci } c_m = \frac{p}{K_{Hc}} M_A = \frac{79 \cdot 10^3}{15,589 \cdot 10^7} \cdot 28,0134 = 0,0142 \text{ g/l.}$$

Jeden litr vody nasycený vzduchem tedy rozpustí 23,1 mg vzduchu. 8,9 mg (38,5 %) připadá na kyslík a 14,2 mg (61,5 %) na dusík. Pro účely měření rozpuštěného kyslíku ze vzduchu lze tedy koncentraci kyslíku 8,9 mg/l považovat za 100 % nasycení. Rozpustnost plynu je dále závislá na obsahu rozpuštěných solí ve vodě, kdy většina solí rozpustnost plynů snižuje. Dále je měření ovlivněno atmosférickým tlakem a teplotou, což je také nutno brát v úvahu v případě, že měření bude probíhat za odlišných podmínek než kalibrace. [3], [2] Tyto vlivy je možno výpočtem korigovat.

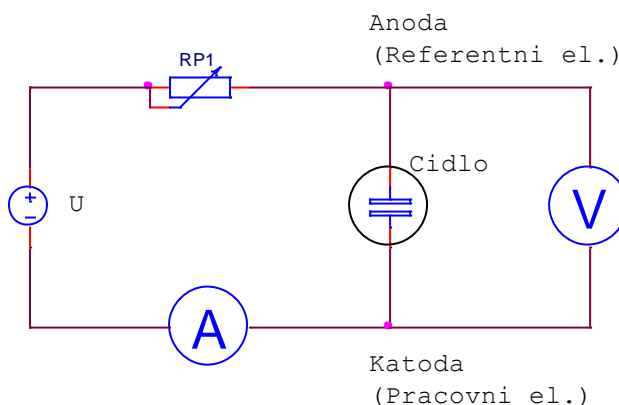
V praxi se používají převážně dvě metody pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku.

### 1.3.1 Optická metoda

Tato metoda využívá vlivu molekul kyslíku na luminiscenci speciálního barviva naneseného ve vrstvě polymeru na snímači. Vyšší koncentrace kyslíku difundovaného ze vzorku do aktivní vrstvy způsobuje definované snížení intenzity a doby luminiscence, takže je možné určit koncentraci kyslíku. Tento způsob měření je výhodný z toho důvodu, že sonda nijak neovlivňuje množství kyslíku ve vzorku. Nevýhodou je dlouhá doba ustálení a poměrně vysoká cena celého systému. [8]

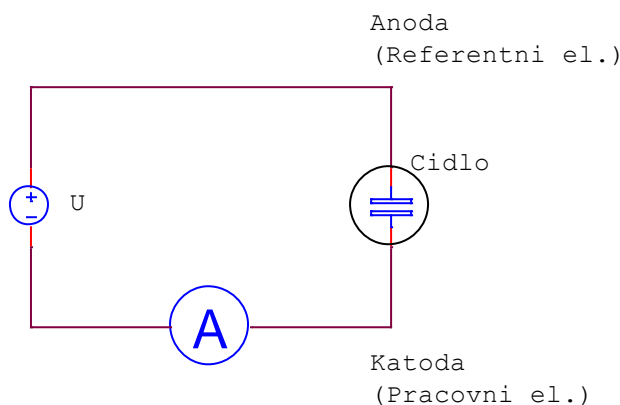
### 1.3.2 Elektrochemická metoda

Jedním z prvních vyvinutých čidel rozpuštěného kyslíku bylo tzv. Clarkovo čidlo. Využívá polarografického principu – na čidlo se přiloží nastavitelné stejnosměrné napětí a měří se proud tekoucí elektrodami. Voltmetr ve schématu má nekonečný vstupní odpor, aby nedocházelo k chybě měření proudu. V případě, že je proud elektrodou velmi malý a úbytek napětí na ampérmetru konstantní nebo známý, lze zapojení upravit na následující variantu. Čidlo je přímo napájeno zdrojem konstantního napětí, a měří se proud tekoucí obvodem. Pro úplnost je uvedeno i zapojení tříelektrodové sondy s potenciostatem. Proud protéká mezi pracovní a pomocnou elektrodou, referentní elektroda slouží k měření napětí mezi pracovní a referentní elektrodou a jeho regulaci na konstantní hodnotě. Toto zapojení dokáže kompenzovat změny odporu roztoku. [7]

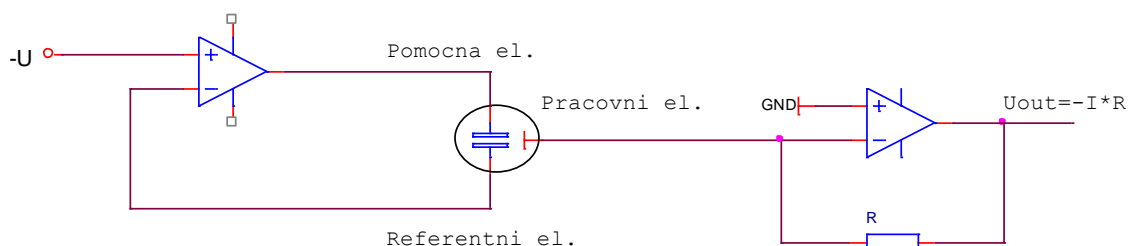


Obr. 4: Zapojení pro ampérometrické měření





Obr. 5: Zjednodušené zapojení pro ampérometrické měření



Obr. 6: Zapojení s potenciostatem a tříelektrodovou sondou

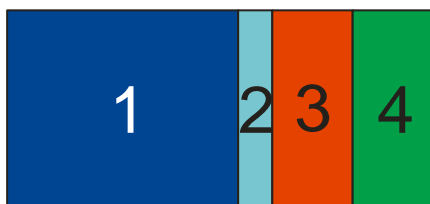
### 1.3.3 Konstrukce Clarkova čidla

Na obrázku je zobrazeno v řezu čidlo rozpuštěného kyslíku. Hlavní částí je platinová elektroda (katoda), zatavená ve skleněném plášti a na konci zabroušená. Průměr odkrytého platinového terčíku se pohybuje v desetinách milimetru. Kolem střední části elektrody je omotán stříbrný drát, který tvoří referentní Ag/AgCl elektrodu (anoda). Prostor uvnitř pláště elektrody je naplněn elektrolytem, v tomto případě roztok chloridu draselného. Nejdůležitější prvek je membrána, která je napnutá přes platinovou elektrodu. Tato membrána je propustná pro kyslík, odděluje elektrody a elektrolyt od měřeného vzorku. Materiál je obvykle teflon nebo polyetylén. [7]



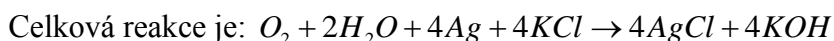
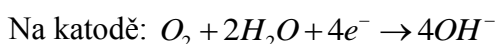
Obr. 7: Clarkovo čidlo rozpuštěného kyslíku

Na dalším obrázku je zvětšený řez membránou. Platinová elektroda 1 je oddělená membránou 3 od měřeného vzorku 4. Přestože je membrána v přímém kontaktu s platinovou elektrodou, je mezi nimi slabá vrstva elektrolytu, a tím je uzavřen elektrický obvod mezi oběma elektrodami. Kyslík difundující membránou je okamžitě na katodě redukován.



Obr. 8: Detail membrány

Funkci čidla lze charakterizovat následujícími chemickými reakcemi:



Je tedy vidět, že při měření se kyslík spotřebovává a také se stříbrná anoda pokrývá vrstvou chloridu stříbrného. Čidlo tedy má omezenou životnost. Pro funkci čidla je nutno na elektrody připojit polarizační napětí kolem 600-800 mV, aby probíhala výše popsaná reakce. Ustálení do stavu umožňujícího měření se pohybuje kolem 15 minut, během této doby se zredukuje veškerý kyslík, který mohl zůstat v komoře snímače. Poté je možné měřit proud čidlem, který je přímo úměrný koncentraci kyslíku ve vzorku. Pokud není žádný kyslík přítomen, k reakci nedochází a proud čidlem je v ideálním případě nulový.



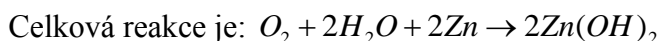
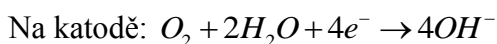
Obr. 9 Skutečné provedení čidla

Potřeba značného průtoku měřené vody je dána tím, že dochází k neustálé difuzi kyslíku do čidla, kde je spotřebováván. Pokud by voda dostatečně neproudila, naměřená hodnota koncentrace by neustále klesala, jak by se spotřebovával kyslík v blízkosti sondy. Do jisté míry lze tento nežádoucí jev omezit zmenšením plochy platinové elektrody, což s sebou přináší snížení maximální hodnoty proudu. Dalším řešením je

použití pulzního napájení a tříelektrodeového čidla, více informací je v americkém patentovém spise US 5,217,595.

Pokud se pro katodu čidla použije méně ušlechtilý kov, jako například zinek nebo olovo, a pro anodu stříbro, vznikne tzv. galvanický článek. Vzniklé polarizační napětí je dané rozdílem hodnot napětí pro dané kovy v elektrochemické řadě. Čidlo tedy nepotřebuje napájet, samo generuje napětí. Stačí tedy měřit procházející proud. Výhodou čidla je jednodušší vyhodnocení signálu, absence napájecích obvodů. Nevýhodou je, že reakce probíhá za přítomnosti kyslíku neustále a tím dochází k opotřebení elektrod. Vznikající oxid zinečnatý navíc netvoří pevnou vrstvu, ale odlupuje se a tvoří kal, který se usazuje na membráně. To vyžaduje častěji údržbu čidla – čištění, příp. výměnu membrány a elektrolytu.

Probíhají následující chemické reakce:



#### 1.3.4 Interpretace naměřených hodnot

Výstupní veličinou Clarkova čidla je elektrický proud, který je přímo úměrný parciálnímu tlaku kyslíku v měřeném vzorku. Parciální tlak kyslíku v sondě za membránou lze uvažovat nulový, protože veškerý kyslík je okamžitě redukován. Primární hodnotou, kterou čidlo měří je parciální tlak kyslíku ve vzorku. Pomocí kalibrace ve dvou bodech – bez kyslíku a při určitém parciálním tlaku kyslíku lze určit převodní charakteristiku – její směrnici a případné posunutí nulového bodu. Protože rozpustnost kyslíku ve vodě je teplotně závislá, je nutno provádět teplotní kompenzaci. Dále má na měření vliv i atmosférický tlak, pokud bude při měření výrazně jiný než při kalibraci, je nutno provést i tuto korekci

Pro praktické použití je možné použít veličinu procentuální saturace vody rozpuštěným kyslíkem: 0 % odpovídá vodě bez kyslíku a 100 % odpovídá vodě nasycené vzduchem. Pokud je použita tato stupnice, může hodnota v případě, že je voda sycena nikoliv vzduchem ale čistým kyslíkem, přesáhnout 100 %.

Druhá možnost je přepočet saturace přímo na koncentraci rozpuštěného kyslíku v mg na litr vody. Pro vodu nasycenou vzduchem (saturace 100 %) je to výše zmiňovaných 8,9 mg kyslíku na litr vody.

Pro co nejpřesnější měření je vhodné čidlo kalibrovat za podmínek, ve kterých bude probíhat měření. Pokud bude zaručena stálá teplota vzorku, což je v případě měření spodních vod pravděpodobné, bude přesnost měření záviset pouze na čidlu a dostatečné rychlosti proudění vody kolem membrány.

Vliv změny atmosférického tlaku je relativně malý a pro některá měření ho lze zanedbat. Pokud bude kalibrace provedena při tlaku 100 kPa pomocí vody syčené vzduchem, bude saturace 100 %. Parciální tlak kyslíku je v tomto případě 21 kPa. Ve výšce 1000 m nad mořem je atmosférický tlak přibližně 90 kPa. Parciální tlak kyslíku by v tomto případě byl 18,9 kPa a naměřená saturace vody plně nasycené vzduchem by byla jen 90 %. V případě návrhu měřicí jednotky je však lepší s těmito vlivy počítat, a doplnit možnost volitelného měření tlaku vzduchu a teploty pro případné výpočtové korekce.

Metodika pro stanovení obsahu kyslíku ve vodách je podrobně popsána v [9].

#### 1.4 Měření konduktivity

Konduktometrie je založena na měření iontové vodivosti roztoků. Metoda je velmi rozšířená, přestože není selektivní. Vodivost roztoku záleží na koncentraci iontů rozpuštěné látky a teplotě a je při velkých koncentracích nelineární. Lineární závislost je možné uplatnit pouze ve vybraných případech a pro velmi zředěné roztoky.

Měrnou vodivost (konduktivitu), definovanou jako převrácená hodnota rezistivity, je možné určit z rozměrů tělesa (uvažujme krychli) a elektrické vodivosti tělesa  $G$ :

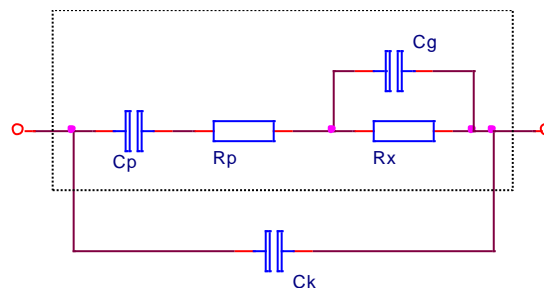
$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{IG}{S} \quad [S/m] \quad (30)$$

Pro účely měření roztoků mohou být použity sondy s rozdílnou geometrií (plocha a vzdálenost elektrod). Ta je charakterizovaná konstantou čidla  $K=l/S$ , určuje se experimentálně měřením standardních roztoků. Změříme-li elektrický odpor mezi elektrodami, dostaneme přímo konduktivitu.

$$\gamma = \frac{1}{R} K \quad [S/m] \quad (31)$$

Měření odporu je nutno provádět střídavým proudem, aby se omezila polarizace elektrod. Důležitá je i vhodná volba geometrie snímače (konstanty  $K$ ) a frekvence podle parametrů roztoku.

Provedení snímačů bývá obvykle plošné (deskové elektrody), materiál je platina nebo grafit. Náhradní schéma vodivostního snímače je na následujícím obrázku.



Obr. 10: Náhradní obvod elektrodového snímače

$C_p$  a  $R_p$  je polarizační kapacita a odpor,  $R_x$  je odpor elektrolytu,  $C_g$  je geometrická kapacita sondy a  $C_k$  je kapacita kabelu.

Pro přesnější měření je možné použití čtyřelektrodové sondy, která odstraňuje vliv polarizace. Mezi proudovými elektrodami leží lineární pásmo závislosti potenciálu na vzdálenosti elektrod, kde je napěťový úbytek nezávislý na stavu elektrod.

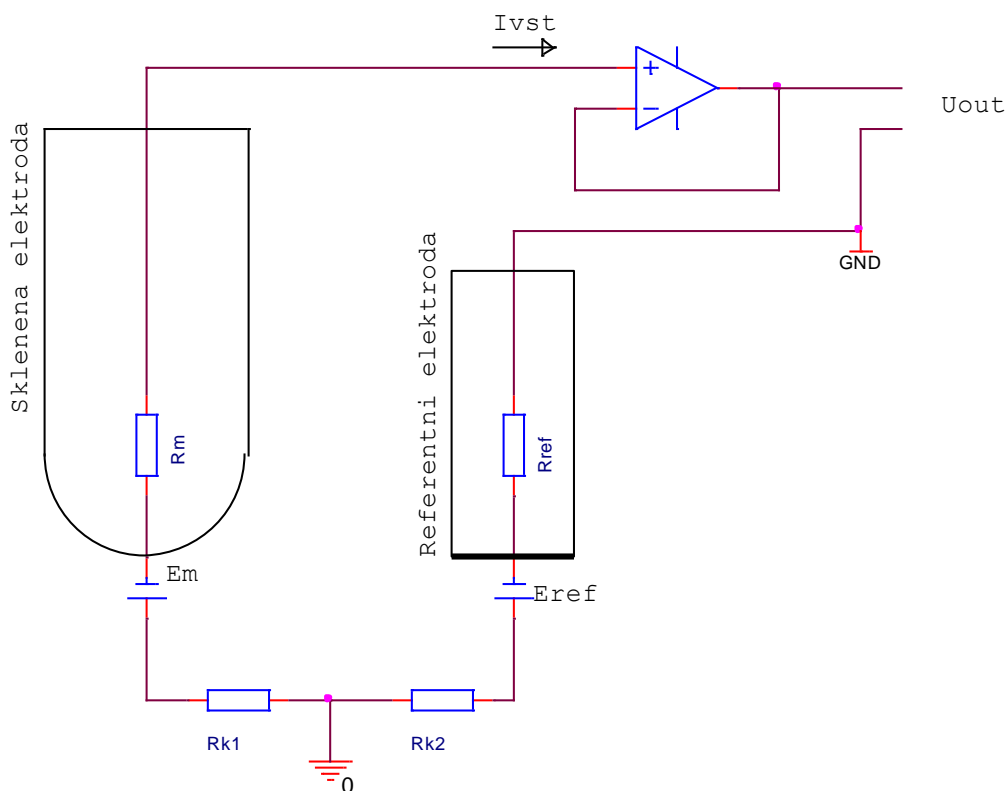
Čidlo je obvykle zapojeno do větve měřicího můstku, kde je nutno kompenzovat teplotní závislost vodivosti. Je ale možno zvolit i jiné metody pro měření odporu čidla. [10]

## 2. Požadavky na zpracování signálu z elektrochemických čidel

### 2.1 Zpracování signálu z elektrod pro měření koncentrace iontů a oxidačně-redukčního potenciálu

Jak kombinované pH či iontově selektivní elektrody, tak i ORP elektrody kladou podobné požadavky na vstupní obvody zesilovače. Výstupní napětí z tohoto typu elektrod může být až kolem  $\pm 2$  V, ale vlastní elektroda má velmi velký vnitřní odpor. Na následujícím schématu je zjednodušené zapojení zesilovače včetně pH elektrody a jsou označeny významné parametry v obvodu.

Příslušné elektrody mají svůj potenciál  $E_m$  a  $E_{ref}$ . Vnitřní odpor referentní elektrody je poměrně malý, řádově stovky  $k\Omega$  – elektroda je naplněna koncentrovaným roztokem soli a od měřeného vzorku oddělena porézním separátorem (fritou). Odpor skleněné elektrody se pohybuje přibližně v rozsahu 20-200  $M\Omega$ . Použité elektrody tuzemské výroby mají dle výrobce odpor v řádu stovek  $M\Omega$ . Vložení obou elektrod do roztoku se uzavře obvod přes  $R_{k1}$  a  $R_{k2}$ , které závisí na vodivosti roztoku. Tyto odpory zároveň tvoří vazbu k zemi v případě, že je nádoba uzemněna.[4]



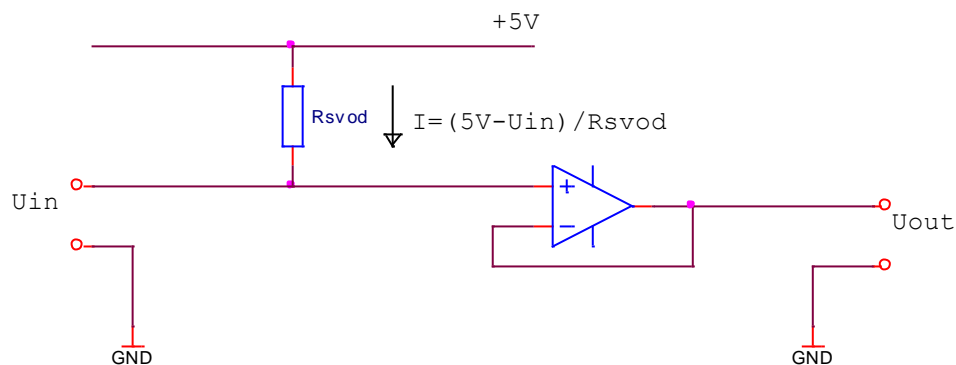
Obr. 11: Měření pH – významné odpory[4]

V případě vložení více elektrod najednou do téhož roztoku může vodivost roztoku způsobit tok vyrovnávacích proudů (především mezi referentními elektrodami), které mohou ovlivnit měření. Z tohoto důvodu se měřicí zesilovače galvanicky oddělují.

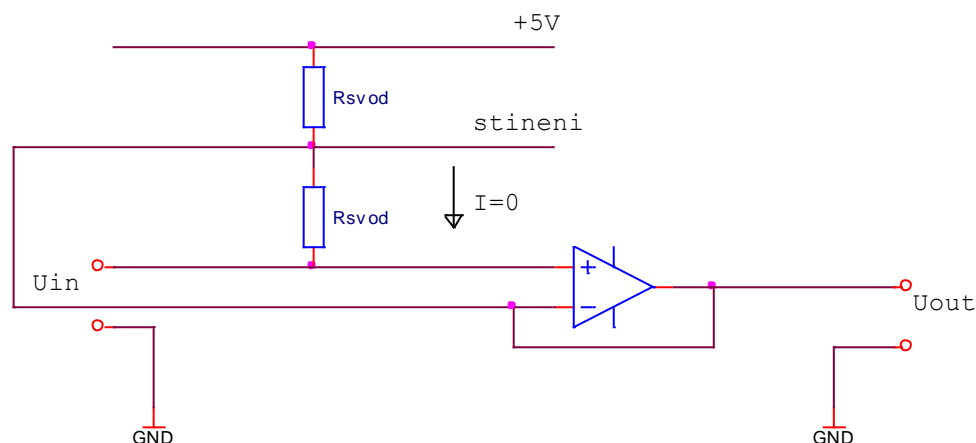
Napětí referentní elektrody je konstantní, a závisí na její konstrukci a na teplotě. Vnitřní odpor této elektrody je relativně malý. Naproti tomu skleněná elektroda, jejíž potenciál je přímo úměrný koncentraci vodíkových iontů, má velmi velký vnitřní odpor. Tento odpor vyžaduje zvláštní konstrukci milivoltmetru. Aby nedocházelo ke zkreslení měření, je kladen požadavek na řádově větší vstupní odpor zesilovače, měl by být minimálně  $10^{12} \Omega$ . Dosažení takového odporu závisí nejen na volbě vhodného operačního zesilovače (nízké vstupní proudy), ale také na uspořádání spoje od elektrody ke vstupu zesilovače. Vstupní odpor zesilovače se projeví jako vstupní proud  $I_{\text{vst}}$  při daném vstupním napětí proti druhé vstupní svorce zesilovače. Dochází tedy ke vzniku odporového děliče a s tím související chybě měření.

Poměrně běžný způsob je vedení spoje vzduchem. S výhodou se používá u většiny přístrojů, kde je na panelu vstupní konektor BNC. Vstupní operační zesilovač se použije v pouzdře DIP, vývod neinvertujícího vstupu se před zapájením do desky odehne, a vodičem přímo připojí na středový pin konektoru. Vstupní odpor je poté definován pouze izolačním odporem konektoru, vzduchu kolem vodiče a vlastnostmi pouzdra i vlastního OZ. Výhodou je jednoduché provedení, ovšem je poněkud náročné na prostor a hlavně neumožňuje plně strojní osazení desky.

Další možností je použití speciálního materiálu DPS, který má výhodné izolační vlastnosti. Používá se například keramika. Kompromisem může být použití standardního materiálu, a svody eliminovat použitím aktivního stínění. Tento přístup byl zvolen pro konstrukci modulu zesilovače. Princip je vidět na následujícím schématu.



Obr. 12: Bez stínění

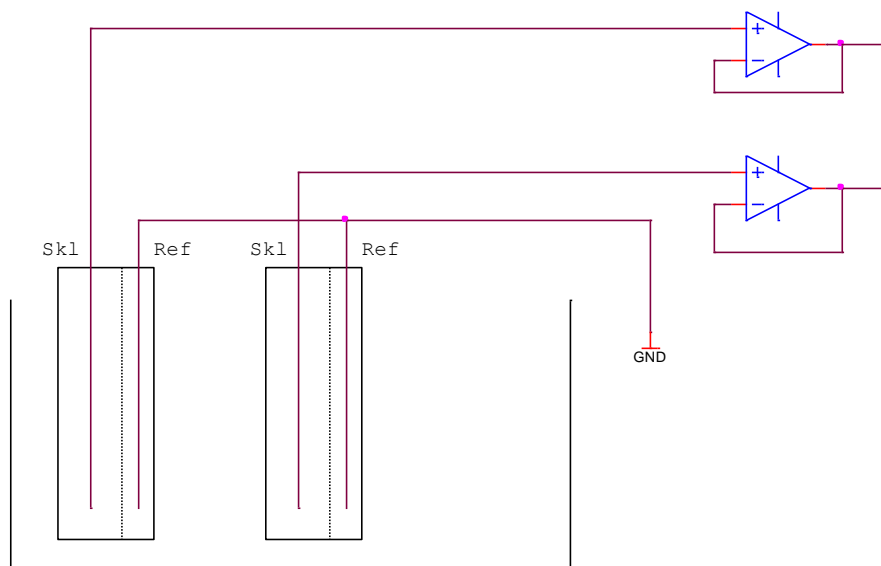


Obr. 13: Aktivní stínění

Pokud je v blízkosti vysokoimpedančního spoje například spoj s napájecím napětím, může vlivem svodových odporů téct velmi malý svodový proud, který však stačí na znehodnocení měření. Svodový proud je způsoben nejenom vlastnostmi základního materiálu desky, ale i případnými nečistotami na desce a vlhkostí, protože běžný materiál FR4 je mírně navlhavý. Vložením spoje, který má stejný potenciál jako měřený signál dojde k významnému potlačení svodových proudů. Rozdíl napětí mezi vysokoimpedančním vstupem a nízkoimpedančním spojem je nulový jen v ideálním případě, ve skutečnosti je velký jako vstupní ofsetové napětí použitého zesilovače. To ale činí zpravidla maximálně jednotky mV, oproti rozdílu několika voltů jako v případě bez stínění. Tento způsob by mohl být řešením pro realizaci veškerých obvodů vstupního zesilovače na desce plošných spojů a byl zvolen k realizaci.

Jak již bylo zmíněno, mohou nastat problémy při požadavku na současné měření pomocí více čidel ve stejném roztoku. Je-li použito více kombinovaných elektrod, není možné spojit vývody referentních elektrod, protože by vlivem jejich mírně rozdílných potenciálů mezi nimi mohl téci vyrovnávací proud. Jedno z řešení je použití nikoliv kombinovaných elektrod, ale poločlanků. Referentní elektroda by pak byla pouze jedna. Toto řešení je z technického hlediska vhodné, ale poločlanky jsou hůře dostupné a mohou být i dražší než kombinované elektrody.

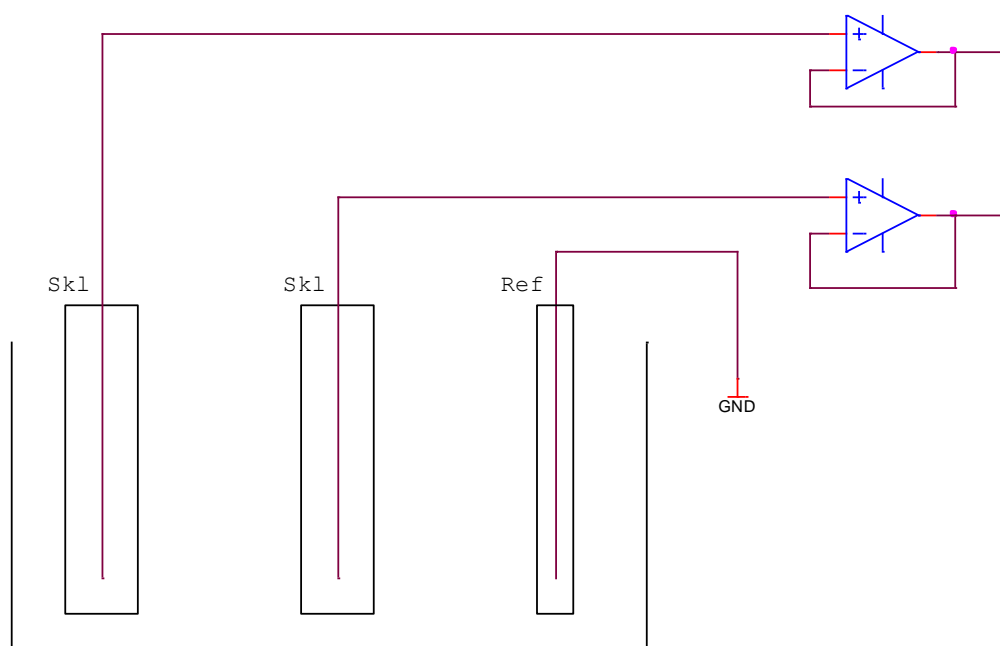




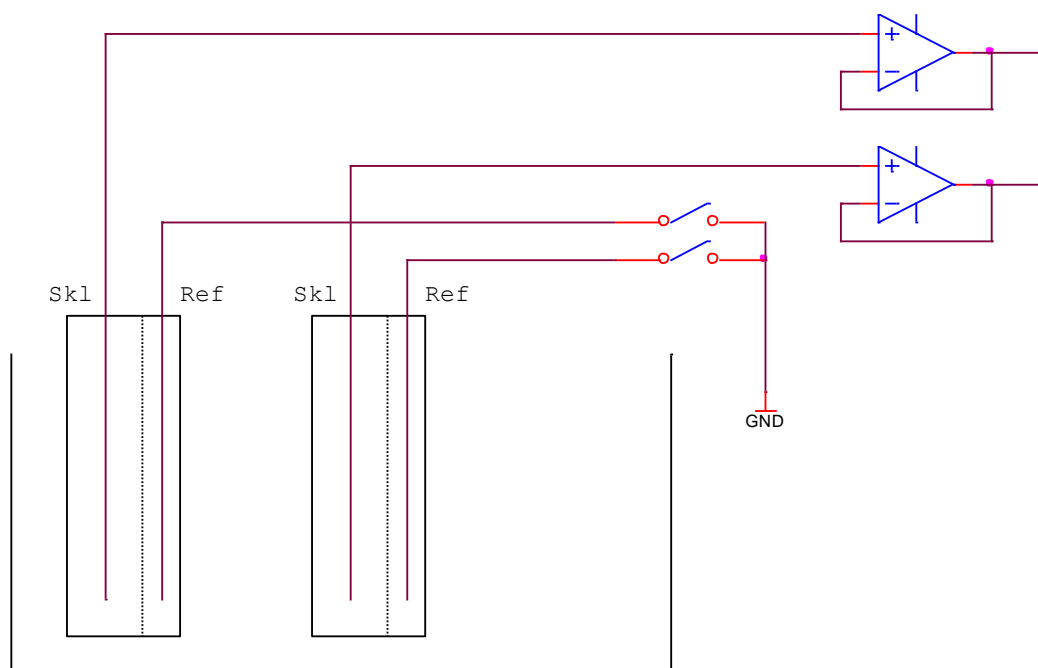
*Obr. 14: Nevhodné spojení kombinovaných elektrod*

Další možností je plně galvanicky oddělit každý měřený kanál. To odstraní tok jakýchkoliv proudů mezi elektrodami, je však poměrně náročné na provedení elektroniky, která je pak značně komplikovaná a obsahuje mnoho funkčně duplicitních obvodů. Kompromisním řešením je použití jen jednoho referentního obvodu z několika kombinovaných elektrod s tím, že vývody ostatních referentních elektrod budou nezapojeny. Toto řešení je poněkud nepraktické, protože v případě výměny referentní elektrody je nutno provést kalibraci všech čidel. Elektricky je toto uspořádání shodné jako při použití samostatných poločlánků – také se využije jen měrná část kombinované elektrody.

Protože v případě měřicího modulu pro ústřednu nebyl kladen požadavek na současné měření více vstupů, je možnou alternativou připojovat k zesilovači jen tu elektrodu, kterou se zrovna měří. Odpojování měrné elektrody není možné díky vysokému vstupnímu odporu zesilovače, postačí odpojovat referentní elektrodu. V následující popsané konstrukci má modul pro tři čidla tři vstupní zesilovače, multiplexer a jeden A/D převodník. V danou chvíli se měří pouze jednou kombinovanou elektrodou, referentní poločlánky ostatních elektrod jsou odpojeny analogovým spínačem.



Obr. 15: Použití samostatných poločlánků



Obr. 16: Odpojení nepotřebných elektrod

## 2.2 Zpracování signálu z Clarkova čidla (koncentrace rozpuštěného kyslíku)

Záleží na druhu čidla, zda je potřeba přivádět polarizační napětí nebo ne. V případě aktivního čidla to není potřeba a postačí měřit proud čidlem, například pomocí jednoduchého převodníku proud/napětí s operačním zesilovačem nebo pomocí

snímacího rezistoru. Pasivní čidlo navíc potřebuje napájet napětím kolem 650 mV, které je možné odvodit z referenčního napětí. Výsledné napětí závisující na proudu čidlem již stačí převést do digitální podoby a dále zpracovat.

## **2.3 Porovnání dostupných převodníků a měřicích přístrojů na trhu**

V současné době již probíhalo měření chemických parametrů spodních vod v tunelu v Bedřichově. Měření bylo ruční, pomocí přenosných měřicích přístrojů. V některých aplikacích bylo použito běžných měřicích ústředí, chemické senzory byly pak vybaveny převodníkem na standardní proudový nebo napěťový signál. Následující odstavce popisují používané přístroje a srovnává jejich parametry včetně ceny.

### **2.3.1 Přístroje pro měření napětí s velkým vstupním odporem (pH, ORP, ISE)**

Pro měření hodnot pH, ORP, případně koncentrací iontů pomocí iontově selektivních elektrod mají přístroje specifické parametry vstupu, je potřeba dosáhnout co nejvyššího vstupního odporu. Velikost napětí z pH sondy se pohybuje obvykle okolo -0,5 až +0,5 V, v případě ORP až  $\pm 1\text{ V}$  i více. Výstupní napětí z výše popsaných čidel jsou teplotně závislá. Jak měřicí přístroje, tak převodníky mohou mít automatickou teplotní kompenzaci, tzn. současně měří teplotu měřeného roztoku pomocí čidla teploty (samostatné, nebo je součástí chemické sondy) a provádějí korekci teplotní závislosti měření.

#### **Greisinger GPHU 014 MP**

Jedná se o převodník na standardní analogový signál 4-20 mA. Minimální napětí pro provoz převodníku je 12 V. Vstup je BNC konektor pro připojení pH sondy a zdířky pro odporový snímač teploty pro funkci teplotní kompenzace. Přístroj je opatřen displejem, hodnota pH je zobrazena s udávanou přesností  $\pm 0,02 \text{ pH} \pm 1 \text{ digit}$ . Přesnost výstupního signálu je  $\pm 0,2 \%$  z celého rozsahu 0-14 pH, resp. 4-20 mA. Vstupní odpor je  $10^{12} \Omega$ . [11] Bylo zjištěno, že obvod měřicího zesilovače je galvanicky oddělen a A/D převod je proveden před galvanickým oddělením, je tedy přenášena již digitální hodnota. Převodník je dvoukanálový, současně měří pH i teplotu. Rozlišení je 24 bitů. Kalibrace je možná dvou i třibodová.

#### **Theta90 PH2**

Je převodník na standardní napěťový signál 0-10 V. Napájení je 24 V, spotřeba není udávána. Přístroj má pouze vstupní konektor BNC, měření teploty neumožňuje.

Kalibrace je pouze dvoubodová (nastavení nuly a offsetu), měřený obvod je opět galvanicky oddělen, celý přístroj je řešen čistě analogově. Měřená veličina se odděluje pomocí lineárního optočlenu. Výrobce nabízí úpravu vstupního rozsahu podle typu čidla.

### **Gryf XBM**

Je interface určený pro připojení různých čidel opatřených převodníkem. Jedná se o přístroj pro laboratorní použití, ke své činnosti vyžaduje počítač. Systém je čtyřkanálový, jednotlivé kanály jsou galvanicky odděleny pomocí transformátorů, které přenášejí jak napájení tak naměřená data v digitální podobě. Měřicí zesilovač je v malé krabici (výrobce používá termín „měřicí hlavice“), která se přímo nasadí na chemickou sondu. Vyrábí se různá provedení označená XB1 až XB6. Je tak eliminován případný vliv přírodních vodičů, signál je okamžitě zesílen a digitalizován. Zesilovač obsahuje kalibrační data a je schopen rozpoznat i typ připojené sondy. Hlavice je opatřena speciálním konektorem pro připojení k čidlu, sondy jsou běžného provedení od tuzemského výrobce. Spojení základního měřicího systému s počítačem je pomocí rozhraní USB, po kterém je celý systém i napájen.

Měřicí hlavice XB2 je určena pro měření napětí  $-1,2\text{ V}$  až  $+1,2\text{ V}$  s přesností  $\pm 0,01\%$ , vstupní odpor je  $10^{12}\ \Omega$ . Je možno připojit čidla pH, ORP a iontově selektivní elektrody. Současně jako druhou veličinu je možno měřit teplotu. Hlavice je připojena k základnímu systému pomocí kabelu opatřeného miniaturním speciálním konektorem. [12]

### **Greisinger GMH 3530**

Je ruční měřicí přístroj pro měření pH, ORP a teploty. Umožňuje zobrazit i přímo hodnotu napětí v mV. Připojení elektrochemického čidla je pomocí konektoru BNC. Napájení je z baterie 9 V. Udávaná přesnost měření je  $0,1\%$  z rozsahu  $\pm 2\text{ V}$ . Vstupní odpor  $10^{12}\ \Omega$ .

### **WTW Multi 350i**

Je univerzální ruční měřicí přístroj od firmy WTW. Umožňuje měřit jak pH, ORP, tak i vodivost, koncentraci rozpuštěného kyslíku, teplotu a atmosférický tlak. Je použito vlastní řešení sondy, které obsahují paměť ve které jsou uloženy kalibrační hodnoty i identifikační data. Z toho vyplývá nevýhoda v nutnosti použití čidel pouze od jednoho

výrobce. Zařízení umožňuje autonomně měřit a zaznamenávat data v nastaveném intervalu. Komunikace s počítačem je možná po RS232. Technické parametry: vstupní rozsah napětí  $\pm 999$  mV s rozlišením 0,1 mV nebo  $\pm 2000$  mV s rozlišením 1 mV. Vstupní odpor výrobce neudává. [13]

V následující přehledové tabulce jsou pro srovnání uvedeny jednotlivé přístroje.

*Tab. 1: Přístroje pro měření pH*

Označení	Provedení	Orientační cena [Kč]	Poznámka
Theta90 PH2	přev. pH/napětí	5000	neumožňuje teplotní kompenzaci.
Greisinger GPHU 014 MP	přev. pH/proud	5000	vyrábí se i s napěť. výstupem
Gryf XBM	interface	9500	jen základní jednotka, až pro 4 kanály
Gryf XB2	měřicí zesilovač	6400	spolu se zákl. jedn. tvoří měř. systém
Greisinger GMH3530	ruční přístroj	3600	
WTW Multi 350i	ruční přístroj	45000	měří více veličin

Pro účely automatického měření jsou vhodné pouze převodníky na standardní signál, původně určené pro průmyslové použití. Toto řešení ale pro vícekanálové měření potřebuje jeden převodník na kanál, což vede jak ke zvýšení spotřeby energie, tak nákladů. Dále popisovaný měřicí modul určený přímo pro geologickou měřicí ústřednu GU100 umožňuje připojit až tři různá potenciometrická čidla a jeden odporový teploměr typu Pt1000.

### 2.3.2 Přístroje pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku

#### **WTW Multi 350i**

Základní popis viz výše. Měření koncentrace pomocí sondy s elektrodami Au/Pb v rozsahu 0-600 % saturace s přesností  $\pm 0,5$  %. Automatická kompenzace teploty a atmosférického tlaku (přístroj obsahuje barometrické čidlo).

#### **Theta90 – upravený převodník PH2**

Používá také čidlo, které nepotřebuje polarizační napětí. Toto čidlo je paralelně připojeno k termistoru 40 k $\Omega$  a je měřeno napětí na elektrodách sondy. Zapojení s teplotně závislým odporem má patrně sloužit k teplotní kompenzaci měření. Žádné další korekce nejsou možné, na převodníku je opět analogová dvoubodová kalibrace. Výstup je v rozsahu 0-10 V, napájení 24 V.

### **Gryf XB4**

Je tzv. měřicí hlavice pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku. Hlavice v sobě integruje měřicí zesilovač, A/D převodník a obslužný mikroprocesor pro komunikaci s hlavní jednotkou. Výrobce udává rozsah měření 0-800 % s přesností 0,5 %. Použitá sonda je vzhledově shodná s Clarkovým čidlem KCPS 29, které je použito i v níže popsané konstrukci měřicího modulu pro geologickou ústřednu GU100. Parametry této sondy jsou také popsány v příslušné stati.

### **Greisinger GMH 3610**

Je ruční měřicí přístroj, využívá kyslíkové sondy s elektrodami Ag/Pb, která nepotřebuje externí zdroj polarizačního napětí. Přesnost je  $\pm 1,5$  %, rozsah 0-300 % saturace. Kompenzace teploty je automatická, korekce na atmosférický tlak je ruční, zadává se aktuální tlak vzduchu. Minimální rychlost proudění tekutiny kolem sondy je 30 cm/s.

*Tab. 2: Přístroje pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku*

Označení	Provedení	Orientační cena [Kč]	Poznámka
Theta90 PH2 (upravený O2)	přev. pO2/napětí	5000	patrně s teplotní kompenzací
WTW Multi 350i	ruční přístroj	45000	měří více veličin
Gryf XBM	interface	9500	jen základní jednotka, až pro 4 kanály
Gryf XB4	měřicí zesilovač	6400	spolu se zákl. jednotkou tvoří měř. systém
Greisinger GMH3610	ruční přístroj	11000	

### **2.3.3 Přístroje pro měření vodivosti – konduktrometry**

#### **Greisinger GLMU 200MP**

Je převodník konduktivity s galvanicky odděleným výstupem 4-20 mA. Měřicí sonda je 4 elektrodová, vybavená termistorem pro měření teploty. K přístroji se připojuje sedmipólovým šroubovacím konektorem. Měřicí rozsahy jsou 4: 0-200,0 mS/cm, 0 - 20,00 mS/cm; 0 – 2000  $\mu$ S/cm a 0 - 200,0  $\mu$ S/cm. Displej ukazuje aktuální hodnotu vodivosti, konfigurace je možná pomocí tří tlačítek. Automatická teplotní kompenzace je nastavitelná.

### **Greisinger GLMU 200MP**

Je ruční konduktometr s pevně připojenou sondou. Parametry rozsahů jsou shodné s výše popsaným převodníkem.

### **Gryf XB1**

Je měřicí hlavice pro 4 elektrodové čidlo vodivosti. Rozsahy: 0,00-20,00  $\mu\text{S/cm}$ ; 0,0-200,0  $\mu\text{S/cm}$ ; 0-2000  $\mu\text{S/cm}$ ; 0,00-20,00  $\text{mS/cm}$ ; 0,0- 200,0  $\text{mS/cm}$ .

Přesnost měření 0,5%. Automatická teplotní kompenzace, přepočet vodivosti na koncentrace pro vybrané roztoky.

### **WTW Multi 350i**

Základní popis viz výše. Měření konduktivity 4 elektrodovou sondou v rozsahu 0-2000  $\text{mS/cm}$ .

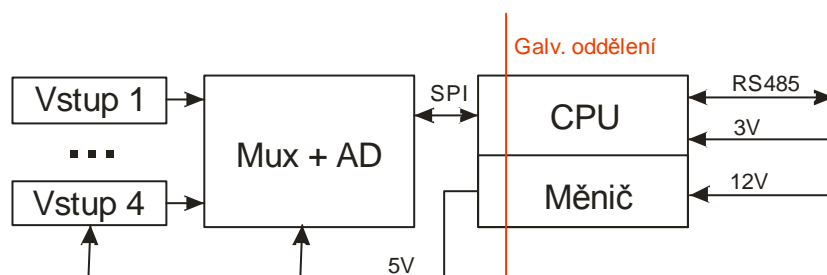
*Tab. 3: Konduktometry*

Označení	Provedení	Orientační cena	Poznámka
Greisinger GLMU 200MP	přev. kond./proud	5000	Průmyslové provedení, displej
WTW Multi 350i	ruční přístroj	45000	měří více veličin
Gryf XBM	interface	9500	jen základní jednotka, až pro 4 kanály
Gryf XB1	měřicí zesilovač	8900	spolu se zákl. jedn. tvoří měř. systém
Greisinger GMH3610	ruční přístroj	11000	

### 3. Návrh modulů pro měřicí ústřednu

Pro měřicí ústřednu GU-100 byly vyvinuty měřicí moduly pro měření napětí z elektrochemických čidel pH, ISE, ORP a modul pro připojení čidla koncentrace rozpuštěného kyslíku. Moduly do měřicí ústředny mají unifikovaný rozměr 100x38 mm. V ústředně jsou pozice pro maximálně 4 moduly. Pro napájení modulů je k dispozici několik napěťových hladin. Trvale je přivedeno napájecí napětí 3,3 V pro napájení logických obvodů. Dále je možné použít hladinu 12 V a 24 V. Z důvodů úspory energie jsou tato napětí zapnutá jen na vyžádání modulu. Komunikace s ústřednou probíhá po sběrnici RS485.

Z prostorových důvodů nebylo možné celé zapojení měřicího modulu realizovat na jedné DPS. Proto byl modul rozdělen na dvě části, komunikační procesorovou desku, která slouží i ke galvanickému oddělení měřicí části. Pro oddělení napájení je použitý DC/DC měnič. Vlastní zpracování signálů z čidel probíhá na samostatné DPS, kde je umístěn celý měřicí řetězec od konektoru pro připojení čidla až po A/D převodník.



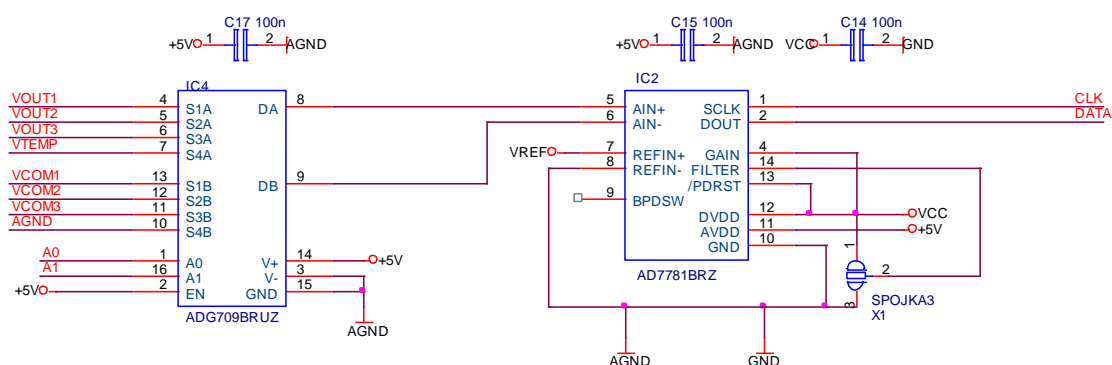
Obr. 17: Blokové schéma

#### 3.1 Modul milivoltmetru s vysokým vstupním odporem

Tento modul má tři vstupní kanály pro měření napětí a jeden kanál pro měření teploty. Volba kanálu probíhá přes dva adresní signály A0 a A1 z procesorové desky, přenos naměřených hodnot je přes sběrnici SPI. Napájení je 5 V. Galvanické oddělení je mezi tímto modulem a deskou s procesorem. Podrobněji budou popsány hlavní části zapojení.



### 3.1.1 A/D Převodník a multiplexer



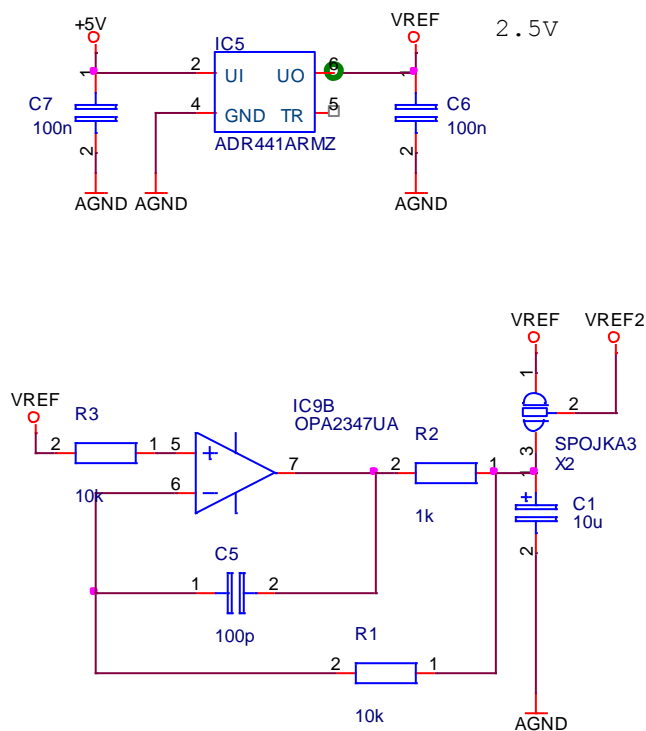
Obr. 18: Obvod A/D převodníku

Jako převodník byl zvolen obvod AD7780. Jedná se o 24 bitový sigma-delta převodník, původně určený pro měření s tenzometrickými můstky. Vnitřní předzesilovač má volitelně zesílení 128, v této aplikaci ale není využitý. S použitým referenčním napětím 2,5 V je vstupní rozsah převodníku (diferenciální vstup)  $\pm 2,5$  V. Výhodou tohoto převodníku oproti většině ostatních převodníků s rozhraním SPI je potřeba pouze dvou vodičů pro komunikaci, která je jednosměrná. Do převodníku nelze nahrát žádné konfigurační slovo, proto není signál data směrem do převodníku potřeba. V případě galvanického oddělení datového rozhraní to přináší úsporu. Propojkou X1 je možno volit parametry vnitřního filtru převodníku. Skutečné rozlišení převodníku je nejméně 18 bitů, což při referenčním napětí 2,5 V a celkovém rozsahu měřeného napětí 5 V umožňuje měřit s rozlišením 0,02 mV.

Softwarová kalibrace eliminuje veškeré pevné chyby jak offsetu tak zesílení. Přesnost měření tak závisí na stabilitě referenčního napětí a přesnosti převodníku. Pro uvažovaný teplotní rozsah 0-50 °C je chyba vlivem reference  $\pm 250$  ppm. Integrovaná nelinearita převodníku je 6 ppm z celého rozsahu, tedy 0,03 mV a teplotní drift offsetu je 150 nV/°C, pro zvolený rozsah teplot 0,00375 mV. Celková chyba by tedy neměla překročit  $\pm 0,25$  % z naměřené hodnoty napětí a dále absolutní chybu  $\pm 0,03374$  mV. Při měření napětí blízkých nule se uplatní chyba absolutní, u měření hodnot na konci rozsahu převažuje chyba vlivem změny referenčního napětí.

Jako multiplexer byl zvolen ADG708. Jedná se o dvojité (diferenciální) multiplexer se 4 vstupy a jedním výstupem. Ovládání je pomocí dvou adresních bitů, obvod má v sobě integrovaný dekodér 1 ze 4. V sepnutém stavu má nízký odpor 3  $\Omega$ . Svodové proudy ve vypnutém stavu jsou max. 100 pA. Malé široké SMD pouzdro TSSOP16.

### 3.1.2 Zdroj referenčního napětí

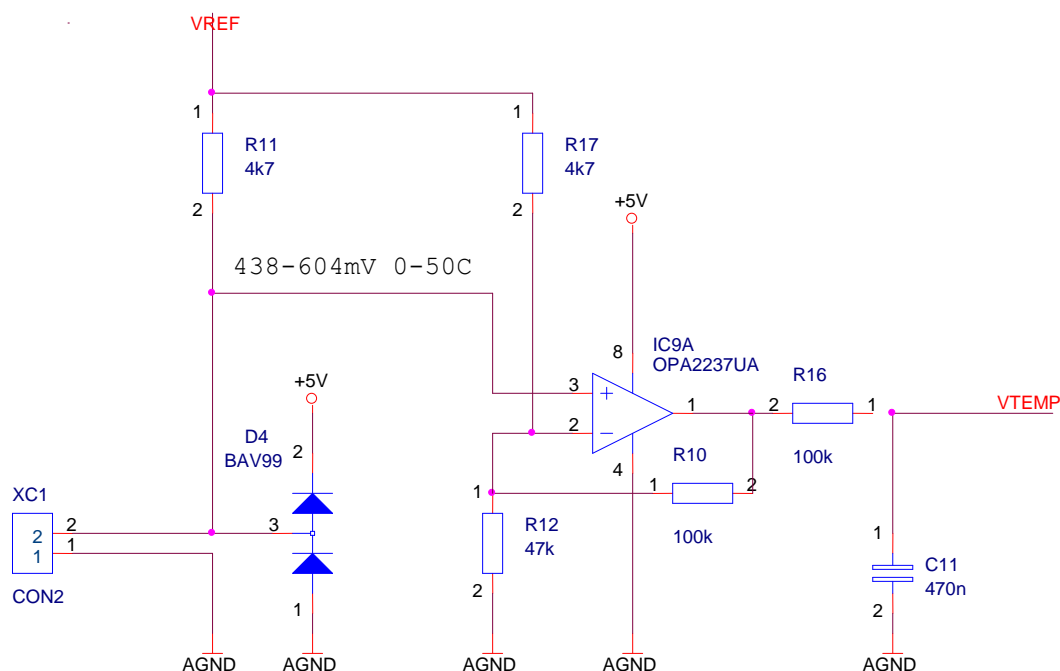


Obr. 19: Reference

Jako vlastní reference byl zvolen obvod ADR441. Je to nízkošumová reference o napětí 2,5 V a teplotním koeficientu nejvýše 10 ppm/°C. Je možno ji zatížit proudem až 10 mA. Je v širokém pouzdře MSOP8. Dále bylo doplněno zapojení sledovače napětí pro případné posílení proudové zatížitelnosti referenčního napětí, např. při použití jiné reference. Zpětnovazební obvod R1, R2, C5 slouží ke kompenzaci velké kapacitní zátěže. [17]

### 3.1.3 Obvod pro měření teploty

Měření teploty využívá odporového čidla Pt1000 v dvou vodičové zapojení. Pro dané účely nebylo čtyřvodičové zapojení považované za nezbytně nutné, odpor vodičů je vzhledem k odporu čidla zanedbatelný, délka vodičů je v řádech několika metrů. Dále je převážná většina chemických čidel, která jsou osazena teplotním čidlem, vybavena kabelem pouze pro dvou vodičové zapojení.



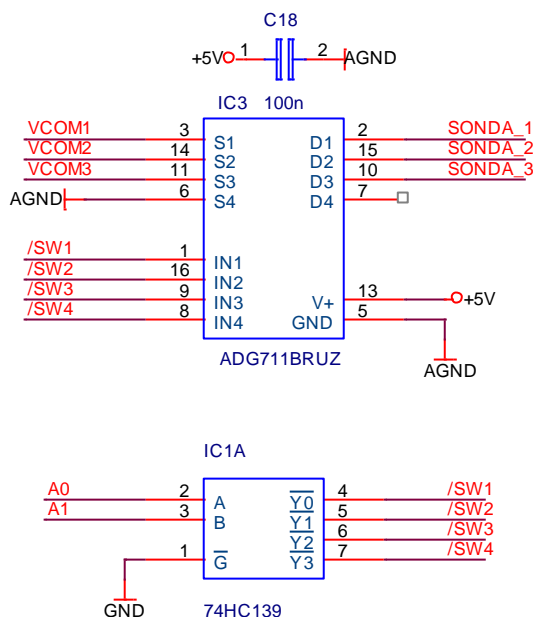
Obr. 20: Měření teploty

Odporové čidlo teploty je zapojeno do dolní části odporového děliče, napájeného referenčním napětím. Pro teplotu  $0^{\circ}\text{C}$  je odpor snímače  $1\text{ k}\Omega$ , napětí z děliče je  $438\text{ mV}$  a protékající proud je  $438\text{ }\mu\text{A}$ . Napětí je přivedeno do neinvertujícího zesilovače se zesílením  $3,12$ . Odpor  $R17$  slouží k posunutí výstupního rozsahu zesilovače a prozatím nebyl osazen. Výstup ze zesilovače je filtrován jednoduchou dolní propustí. Jako OZ byl zvolen typ OPA2237, který se vyznačuje malým offsetem  $250\text{ }\mu\text{V}$  i nízkou klidovou spotřebou  $170\text{ }\mu\text{A}$ . Diode  $D4$  má pouze ochrannou funkci. Jako čidlo je možné připojit Pt1000, Ni1000, případně po úpravě odporů i jiné. Teplotní rozsah je dán povahou chemických čidel a je uvažován od  $0$  do  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro tento rozsah je možné teplotní závislost čidla zapojeného v děliči (kde je závislost napětí na odporu nelineární) aproximovat přímkou s největší chybou  $0,1\text{ }\%$ . Dále je pro určení přesnosti nutno uvážit vliv driftu offsetu zesilovače a změnu zesílení vlivem teplotní závislosti  $R10$  a  $R12$  (uvažujeme  $\text{TC} = \pm 50\text{ ppm/K}$ ). Maximální změna offsetu je  $\pm 0,05\text{ mV}$  vlivem driftu v celém teplotním rozsahu, zesílení se může v nejhorším případě měnit o  $0,15\text{ }\%$ . Celkově má zesilovač převodní poměr  $4,24\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  a celková nejvyšší chyba měření je  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  s rozlišením  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro dané účely jsou tyto parametry postačující.

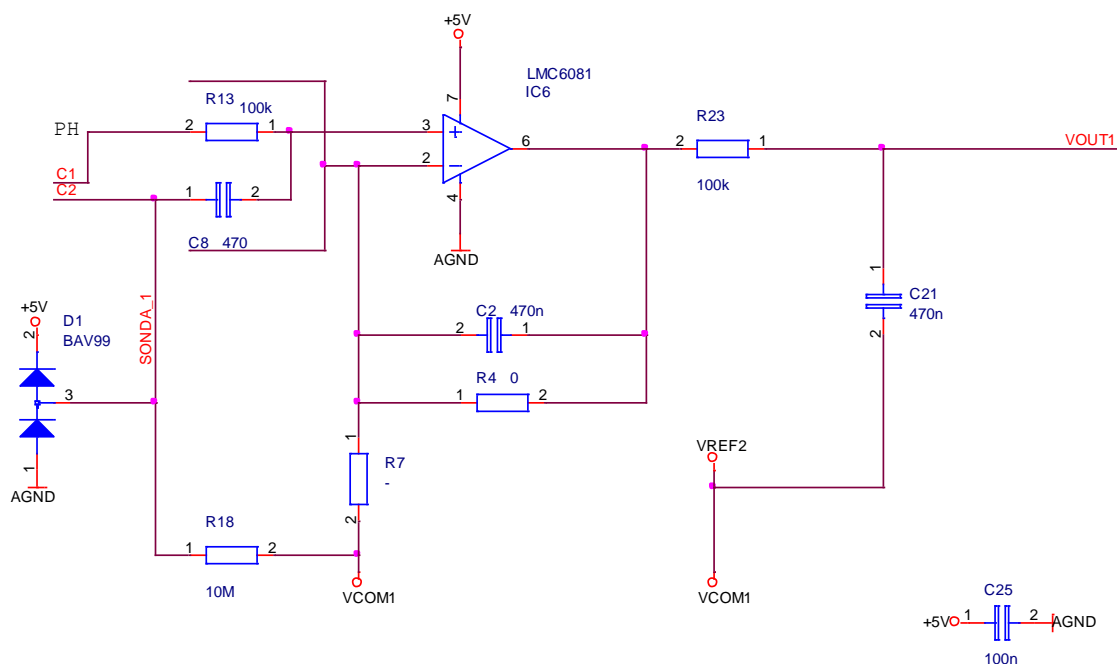
### 3.1.4 Vstupní obvod s vysokou impedancí

Jako vstupní zesilovač byl původně zvolen obvod LMC6081. Vyznačuje se extrémně nízkým vstupním proudem 10 fA při 25 °C. Offset je v řádu 350  $\mu$ V, teplotní závislost offsetu je běžně 1  $\mu$ V/°C. Navržený obvod umožňuje obvod zapojit jako neinvertující zesilovač i jako sledovač vhodnou volbou zpětnovazebních prvků. Pro další vývoj bylo použito zapojení sledovače s jednotkovým zesílením. Signál z čidla je veden dolní propustí se svitkovým kondenzátorem přímo na vstup zesilovače. Spoj na desce je obklopen spojem aktivního stínění, které je spojeno s výstupem zesilovače.

Signál z čidla může nabývat i záporné hodnoty, proto je referentní elektroda připojena na střed napájení, tvořený referenčním napětím. Pomocí analogového spínače ADG711 je vždy připojeno jen to čidlo, na kterém probíhá měření. Umělý střed napájení je označen VCOM, referentní elektroda je na signálu SONDA. Vývody ostatních referentních elektrod jsou na tento potenciál připojeny přes rezistor 10 M $\Omega$ , který je řadově větší než vnitřní odpor dané elektrody. Tyto rezistory překlenují analogové spínače, takže všechny referentní elektrody mají definovaný potenciál. Řízení spínačů je odvozeno od zvoleného kanálu multiplexeru u AD převodníku. Dekódování obstarává polovina obvodu 74HC139.



Obr. 21: Spínání elektrod a dekodér



Obr. 22: Vstupní zesilovač

Během vývoje se ukázalo, že obvod LMC6081 má sice výhodné parametry vstupů, ale při nesymetrickém napájení 5 V ho nelze použít. Napětí na vstupu totiž musí být minimálně o 2,5 V nižší než napětí napájecí. Toto by bylo splněno pouze při větším záporném napětí ze sondy. Jako náhrada byl zvolen zesilovač OPA347, který dovoluje vstupní napětí o maximální hodnotě ( $U_{\text{napájecí}} - 200 \text{ mV}$ ). Vstupní proud je maximálně 10 pA, typicky 0,5 pA. Offset 2 mV, drift 0,003 mV/°C. Tyto parametry jsou pro dané použití stále vyhovující. Vlivy offsetů se odstraní kalibrací, vlivy teploty jsou vzhledem k povaze měřených napětí zanedbatelné. Rozlišení měřeného napětí závisí pouze na parametrech AD převodníku a s hodnotou 0,02 mV je mnohem lepší než povaha signálu vyžaduje (kolísání o řádově mV při zamíchání roztoku) vyžaduje.

První kanál byl osazen zesilovačem dle návrhu na desce plošného spoje, druhý kanál byl pro srovnání zapojen ve vzduchu. Plocha nad spojem včetně aktivního stínění je odmaskovaná. Porovnání výsledků by mělo vést k závěru, jestli je při použití aktivního stínění možné použít běžný materiál plošného spoje FR4 nebo je nutno použít materiál s lepšími izolačními vlastnostmi, případně zapojení vodičem ve vzduchu.

Následující tabulka srovnává několik materiálů pro DPS, které je možné případně použít.

Tab. 4: Základní materiály pro DPS

Materiál	Povrchový odpor [MΩ]
Skelný laminát FR4	$1 \times 10^4$ až $1 \times 10^5$
RO4003C (keramicko-plastový laminát)	$4,2 \times 10^9$
RO4450B	$3,8 \times 10^7$
P95 (polyimid)	$3 \times 10^6$

Povrchový odpor je definovaný jako odpor mezi dvěma elektrodami na povrchu materiálu podle vztahu:

$$R_p = \frac{R \cdot l}{w}, \quad (32)$$

kde  $R_p$  je povrchová vodivost,

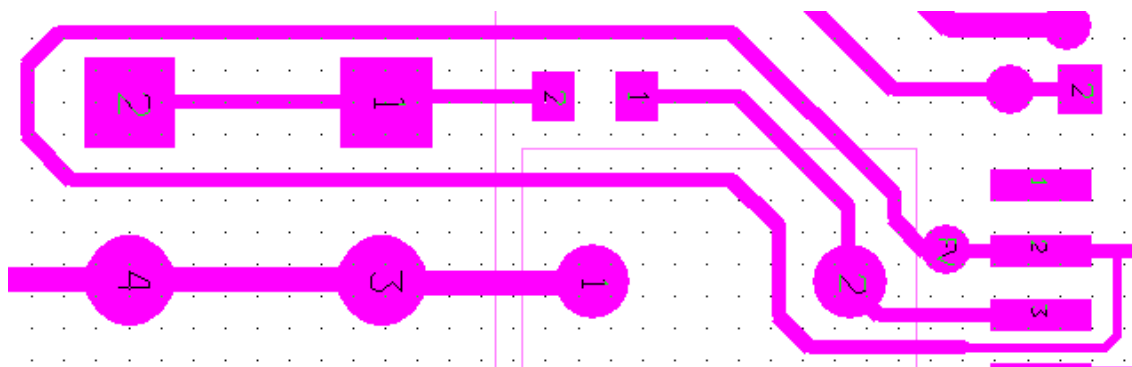
$R$  je naměřený odpor mezi spoji testovacího obrazce,

$l$  je vzdálenost souběžné délky spojů

$w$  je mezera mezi spoji

Blíže viz [16].

Pro následující obrazec spojů použitých pro aktivní stínění prvního kanálu lze přibližně určit odpor mezi spoji a tím i vstupní (svodový) proud při daném rozdílu napětí mezi spoji – offsetovým napětím zesilovače. To je pro OPA347 v nejhorším případě včetně započítání teplotního driftu v rozsahu 0-50 °C 6,15 mV. Naměřená hodnota byla 1,15 mV.



Obr. 23: Obrazec spoje vstupního obvodu

Rozdělíme spoje na dva úseky, jeden v místě plošek pro součástky, kde jsou spoje k sobě blíže a druhý pro úsek spojů vzdálenějších. Přibližné hodnoty pro první úsek  $w = 0,3$  mm,  $l = 11,6$  mm a druhý úsek  $w = 0,8$  mm,  $l = 28$  mm. Pro materiál FR4 pak vychází odpor zhruba 135 MΩ. Při offsetu 6,15 mV to způsobí svodový proud 46 pA. Při 1,15 mV pak 8,5 pA, což je na hranici použitelnosti. V každém případě je nutné

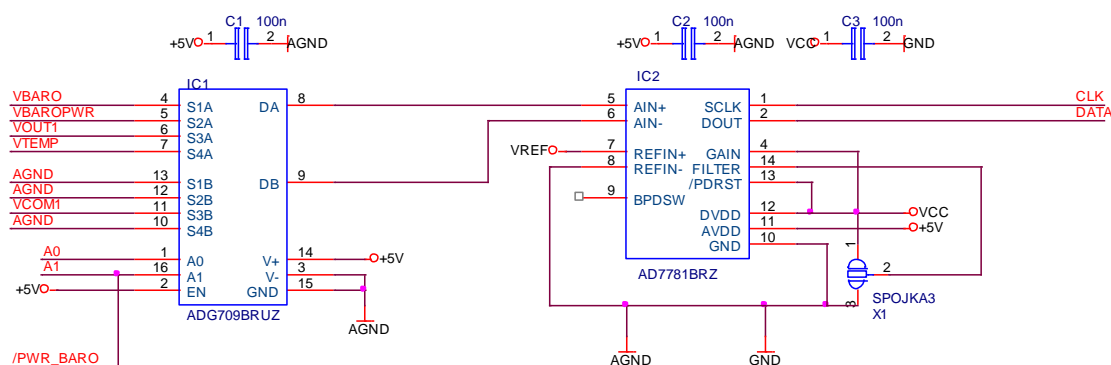
odmaskování desky až po okraje stínění, její důkladné očištění po osazení a nalakování vhodným izolačním lakem.

### 3.2 Modul pro připojení Clarkova čidla (měření koncentrace kyslíku)

Umožňuje měřit koncentraci rozpuštěného kyslíku, absolutní atmosférický tlak a teplotu. Převodník je 20 bitový, komunikace s procesorem je opět po sběrnici SPI, napájení 5 V z téže desky. Modul má stejné mechanické rozměry i elektrické rozhraní jako výše popsany modul milivoltmetru.

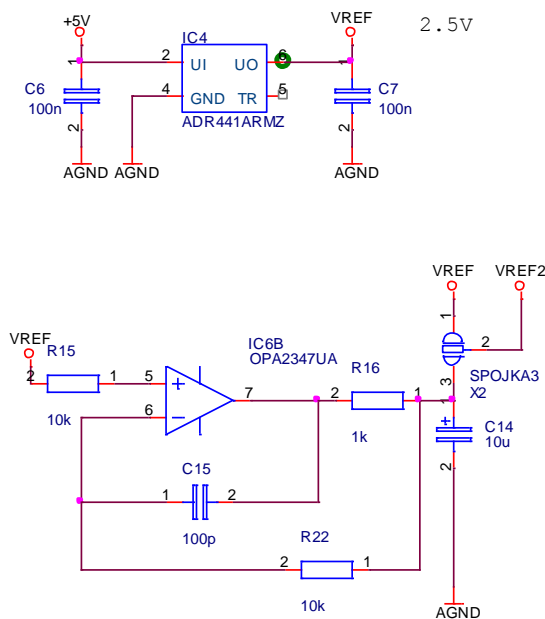
#### 3.2.1 AD převodník s multiplexerem, obvody referenčního napětí

Je zapojen shodně jako u modulu pro měření napětí. Byl osazen 20 bitový převodník AD7781, který je pinově kompatibilní s 24 bitovým AD7780.



Obr. 24: Obvod A/D převodníku

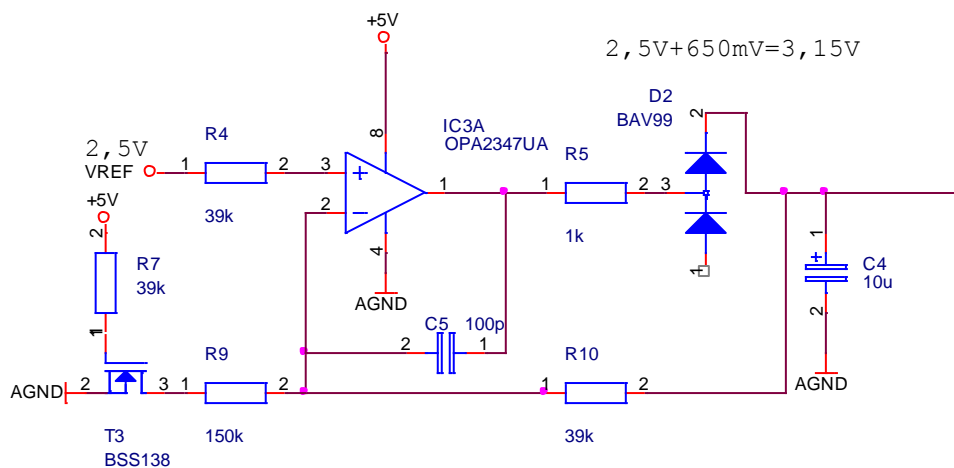
Referenční napětí je opět posíláno sledovačem. Nízkošumová reference ADR441 tento obvod nutně nepožaduje, sama je značně proudově zatížitelná.



Obr. 25: Zdroj referenčního napětí

### 3.2.2 Zdroj polarizačního napětí pro Clarkovo čidlo

Vybraný typ čidla KCPS 29 (DHJ Praha) vyžaduje polarizační napětí  $650 \pm 10$  mV. Po přiložení napětí na čidlo dojde k polarizaci a po ustálení, které trvá asi 15 minut je možné začít měřit.

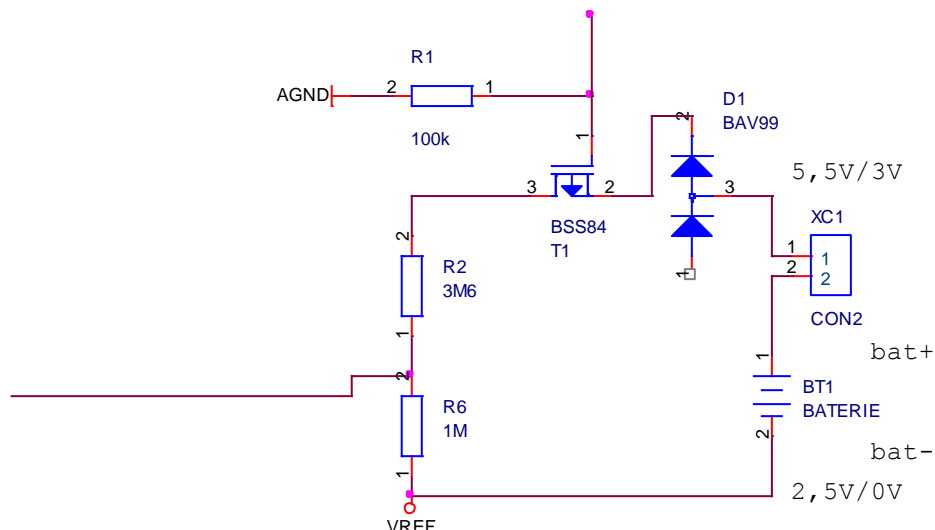


Obr. 26: Zdroj polarizačního napětí

Neinvertující zesilovač dává na výstupu potřebné polarizační napětí vztažené k referenčnímu. Jeho hodnota je odvozena od zesílení a referenčního napětí. V obvodu zpětné vazby je zapojen tranzistor T3, který je sepnutý v případě, že je aktivní napájení



elektroniky. Při odpojeném napájení je rozepnutý a zpětnovazební větví nemůže téct proud. Dioda D2 zamezuje toku proudu do výstupu operačního zesilovače, když je vypnutý. Na kondenzátoru C4 je napětí trvale, z popsaného zdroje nebo z lithiového článku.



Obr. 27: Pomocný zdroj polarizačního napětí

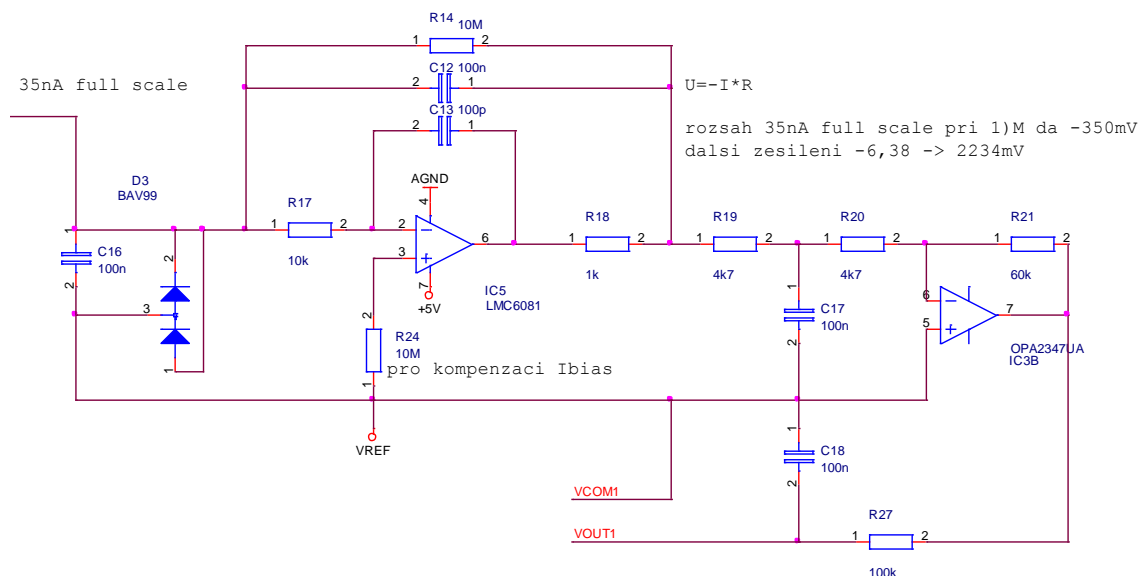
Napětí z 3 V článku CR2032 je sníženo na potřebnou velikost děličem R2, R6. Tranzistor T1 má spínat v případě vypnutého napájení. Při realizaci byly komponenty T1, D1, R1 vypuštěny. Polarizační napětí z děliče je o něco nižší než z provozního zdroje, dělič má velký odpor. Při provozu je proud, který by vybíjel článek zanedbatelný. Při vybíjecím proudu cca. 1  $\mu$ A je životnost baterie s kapacitou 220 mAh minimálně 10 let.

Trvalá polarizace byla použita z důvodu okamžité připravenosti k měření. Pokud je měřicí modul vypnutý, je čidlo napájeno napětím o několik desítek mV menším než za provozu, toto však stačí k snížení doby, po kterou dochází k ustálení čidla. Očekává se možnost měřit do minuty po zapnutí.

Pozn.: Kondenzátor C4 byl při ožívování nahrazen svitkovým 470 n, místo na zem je připojen na VREF.

### 3.2.3 Převodník proud/napětí pro Clarkovo čidlo

Zvolené čidlo má pro maximální hodnotu udaný pracovní proud přibližně 25 nA. Byl zvolen maximální vstupní proud pro měření 35 nA.



Obr. 28: Nanoampérmetr

Jako virtuální nula je zvoleno opět referenční napětí 2,5 V. Veškeré hodnoty napětí jsou vztaženy k této úrovni. Napětí měřené diferenciálním vstupem A/D převodníku je také vztaženo k tomuto bodu.

Operační zesilovač IC9 je zapojen jako převodník proud/napětí. Jeho zesílení určuje zpětnovazební rezistor R14 o velikosti 10 MΩ. Paralelně je připojen svitkový kondenzátor pro vyhlazení prudkých změn. Pro lepší stabilitu je použit kompenzační obvod R17, C13 a R18. Odpor R24 slouží k vyrovnání nesymetrie vstupních proudů zesilovače, pro funkci však vyloženě nutný není. Vstup je chráněn dvojicí antiparalelně zapojených diod. Výstupní napětí převodníku podle vztahu  $U = -I \cdot R$  je při maximálním vstupním proudu 35 nA a  $R14 = 10 \text{ M}\Omega$  rovno  $U = -35 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^6 = -350 \text{ mV}$ . Toto napětí je pro přímé připojení k A/D převodníku již možno použít, ale pro využití plného rozsahu převodníku bude ještě zesíleno. Je možné ho přímo zvětšit zvýšením R14, ale to naráží na omezení maximálních hodnot běžně dostupných rezistorů, dále by příliš velký odpor mohl vést k nestabilitě nebo citlivosti na vnější vlivy.

Původně byl navržen převodní odpor 1 MΩ, se kterým ale zapojení vykazovalo malou citlivost a bylo více náchylné na zesílení chyb druhým stupněm se zesílením -65.

Za převodník byl zařazen invertující zesilovač o zesílení  $-R21/(R19+R20) = -60/9,4 = -6,38$ . Při maximálním vstupním proudu bude napětí 2234 mV, takže je využit celý rozsah převodníku i jeho rozlišení.

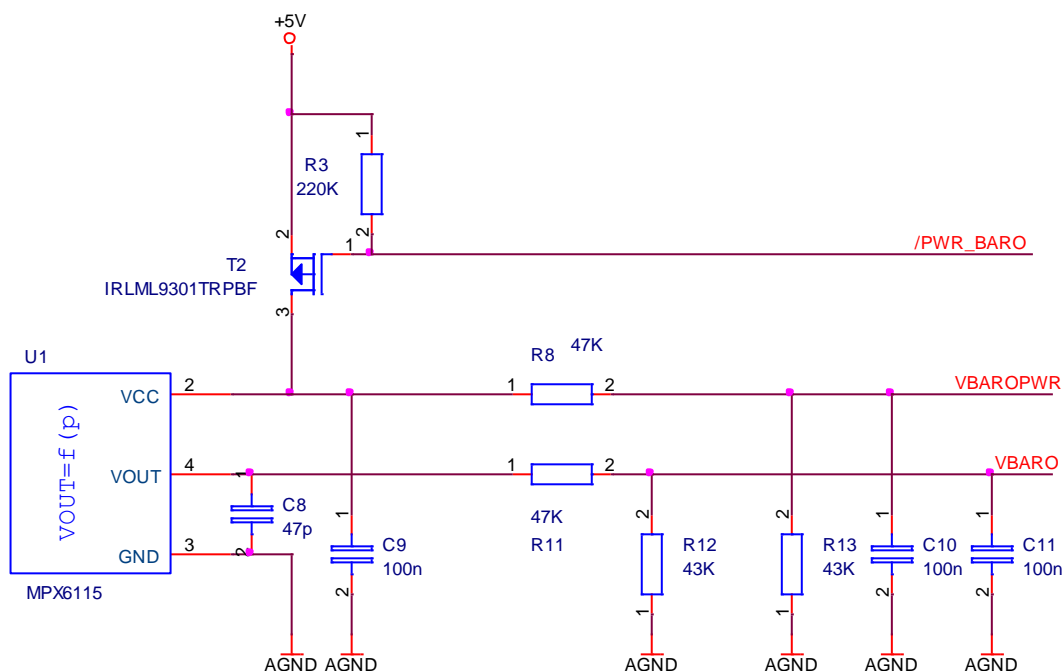
Kondenzátory C17 a C18 tvoří dolnoproustní filtry pro potlačení šumu a prudkých změn napětí. Přesné zesílení celého řetězce není možné přesně určit, proto je provedena kalibrace při nulové hodnotě proudu a při definovaném proudu blízko konce rozsahu. Hodnota z A/D převodníku je poté pomocí kalibračních konstant v mikroprocesoru přepočítána přímo na hodnotu proudu nebo koncentraci kyslíku.

Na chybu měření proudu mají opět především vliv teplotní závislosti odporů a drift offsetu operačního zesilovače. Kalibrací se vliv offsetu a chyby zesílení odstraní, zbudou pouze teplotní závislosti a časová stálost parametrů součástek. Vliv změny R14 s  $TK = 50 \text{ ppm/}^{\circ}\text{C}$  v rozsahu  $0 - 50^{\circ}\text{C}$  je po uvážení zesílení druhého stupně v nejhorším případě 0,72 %, po přičtení chyby zesílení druhého stupně je maximální chyba  $\pm 1 \%$ . Dále se ještě uplatní vliv teplotního driftu offsetu obou zesilovačů, přičemž drift prvního OZ se násobí zesílením druhého. Celková chyba obou stupňů je nejvýše  $\pm 1 \text{ mV}$ . Uvažujeme-li celkový převodní poměr  $1 \text{ nA} = 63,8 \text{ mV}$ , projeví se tato chyba jako  $\pm 0,016 \text{ nA}$ . Při maximálním proudu  $35 \text{ nA}$  je tedy celková chyba  $\pm 1 \%$ , při nulovém proudu pak  $\pm 1,5 \%$ .

#### **3.2.4 Snímač absolutního tlaku vzduchu**

Pro potřeby kompenzace naměřené koncentrace kyslíku je vhodné znát hodnotu atmosférického tlaku. Bylo zvoleno čidlo MPX6115A. Napájecí napětí je  $5 \text{ V}$ , výstupní napětí je přímo úměrné hodnotě tlaku. Protože je závislé i na napětí napájecím, je do jednoho kanálu multiplexeru zavedeno i měření napájecího napětí čidla. Měření tlaku probíhá tak, že je nejprve změřeno napájecí napětí čidla a poté teprve výstupní napětí. Z obou hodnot je pak vypočítán tlak. Z důvodu vysoké spotřeby čidla,  $6 \text{ mA}$ , je napájení zapnuto jen v době měření. Měřená napětí jsou přizpůsobena vstupnímu rozsahu převodníku pomocí odporových děličů 47k:43k.

Měření je poměrové, chyba může být vnesena teplotní závislostí odporových děličů a je nejvýše 0,25%. Vliv změny napájecího napětí se neuplatní. Snímač tlaku má dále udanou maximální chybu  $1,5 \text{ kPa}$  pro celý rozsah. Pro účely měření atmosférického tlaku uvažujeme rozsah  $90 - 100 \text{ kPa}$ , celková chyba je v nejhorším případě do  $2 \%$ .



Obr. 29: Čidlo tlaku vzduchu

### 3.2.5 Obvod měření teploty

Pro účely teplotní kompenzace naměřené hodnoty koncentrace rozpuštěného kyslíku je nutné znát i teplotu roztoku. Modul je vybaven jedním kanálem pro měření teploty pomocí odporového teploměru v dvou vodičovém zapojení. Standardně je rozhraní přizpůsobeno pro typ Pt1000. Schéma zapojení je shodné jako u modulu milivoltmetru.

## 3.3 Základní modul – procesorová deska

Základní modul má rozměry 100x38 mm a je na obojích kratších stranách osazen dutinkovou lištou. Tímto způsobem se modul spojí s deskou měřicí ústředny. Deska je z ústředny trvale napájena napětím 3,3 V. Dále je na vyžádání přivedeno 12 V, které slouží k napájení izolačního měniče pro zdroj 5V. Součástí desky je i galvanické oddělení všech signálů, které vedou na měřicí modul s převodníkem.

### 3.3.1 Procesor a pomocné obvody

Jako procesor byl zvolen obvod s jádrem ARM Cortex M0 od firmy ST Microelectronics. Obvody s jádrem ARM Cortex jsou v současné době velmi rozšířené a perspektivní a nabízejí vyšší výkon oproti 8 bitovým procesorům. Vzhledem k velkému rozšíření jsou i cenově velmi výhodné. K dispozici je i široká řada ukázkových programů a knihoven. Vybraný typ STM32F051K8 v 48 pinovém pouzdře LQFP obsahuje 64 kB programové paměti Flash a 8 kB datové SRAM. Součástí je

i interní oscilátor, takže pro méně náročné aplikace není potřeba krystal. Pro programování i ladění aplikace je použito rozhraní ST-LINK, které je úsporné co se týče množství obsazených pinů. Kromě napájení a signálu reset je tvořeno jen dvěma vodiči, datovým a hodinovým. Toto rozhraní bylo vyvedeno na 5 pinový konektor XC3. Reset procesoru po zapnutí je zajištěn RC článkem a v případě potřeby při vývoji i ručně, tlačítkem.

Každý modul má dva vstupy, které určují jeho pozici v ústředně. Jedná se o signály `ADR_MOD 0` a `1`. Procesor tak může zjistit, kde se modul nachází. Signál `WKUP_IN:OUT` slouží k probuzení modulu z úsporného režimu ústřednou, případně může modul probudit ústřednu. V této aplikaci tato druhá vlastnost není využita, ale najde opodstatnění například u měřidel průtoku na principu počítání impulzů.

Z procesoru bylo vyvedeno rozhraní pro připojení běžného znakového LCD displeje a také analogový vstup pro připojení několika tlačítek (systém s odporovým děličem). Pro vývoj se tyto možnosti ukázaly nadbytečné, veškerá konfigurace a komunikace s programem v procesoru probíhala přes sériovou linku vyvedenou na konektor XC5. S ústřednou komunikuje procesor rozhraním RS485. Je použit převodník ADM3485 připojený na `USART1` procesoru. `USART2` slouží k vývojovým účelům pro komunikaci s terminálovým programem.

### **3.3.2 Galvanické oddělení**

Měřicí deska je napájena napětím 5 V. Jako zdroj je použit izolovaný DC/DC měnič, který je napájen z 12 V z ústředny, napětí se zapíná signálem `EN_12V`. Za měničem následuje filtr a lineární low-drop stabilizátor. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu, že výstupní napětí měniče je poměrně zvlněné a mohlo by zanechat rušení do napájených obvodů.

Datové signály jsou odděleny pomocí magnetických izolátorů řady ADUM1410 od firmy Analog Devices. Napájení izolátorů na straně procesoru je vypínáno pomocí tranzistoru T1, aby se snížila klidová spotřeba v případě, že je vypnuté napájení měřicí desky. V klidovém stavu je nutné nastavit signály z procesoru do izolátoru do nízké úrovně, jinak se obvod napájí skrze substrátové ochranné diody, které jsou na každém vstupu.

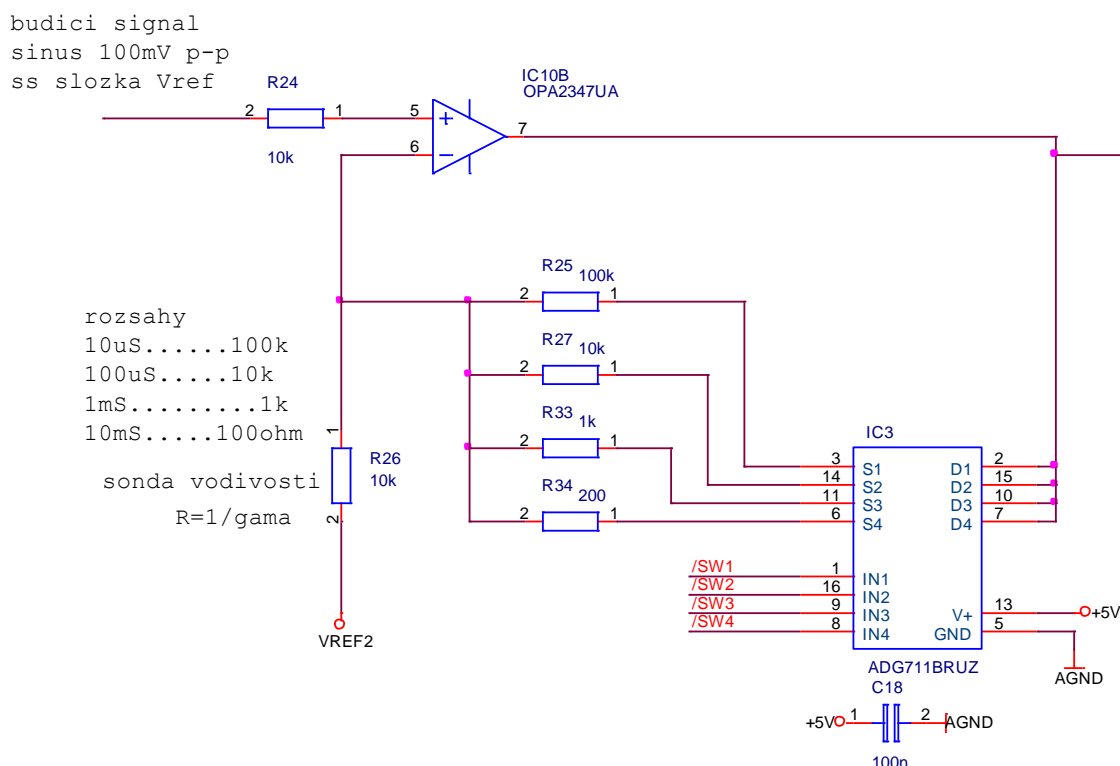
Pro komunikaci s A/D převodníkem po rozhraní SPI je třeba oddělit jeden signál směrem od procesoru a jeden k procesoru. Zbývající dva signály od procesoru slouží

k přepínání kanálů. Schéma počítá s dalšími 4 oddělenými signály směrem od procesoru pro připojení dalších měřicích modulů. Využití by bylo například pro modul konduktometru, kde by procesor přepínal rozsahy a generoval budící signály.

Schéma zapojení desky je z důvodu velkého rozsahu v příloze na CD, kde jsou i ostatní schémata zapojení.

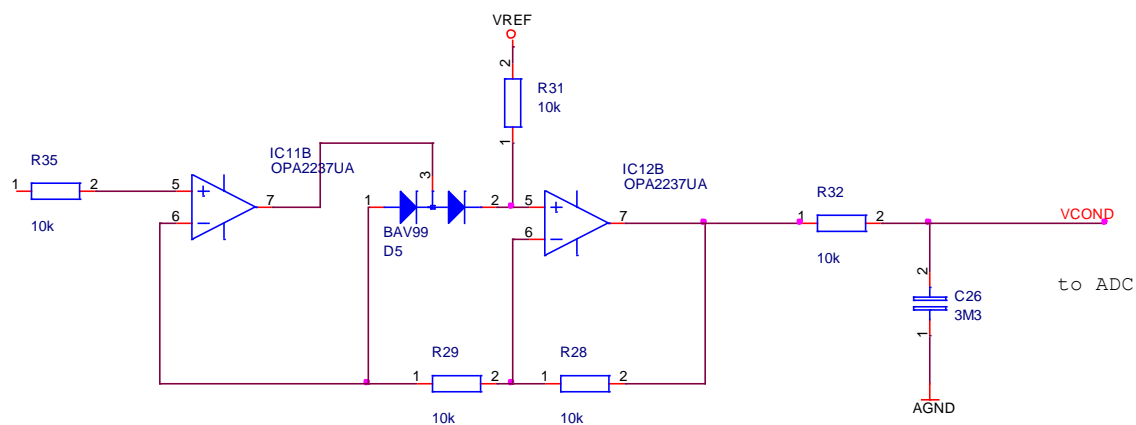
### 3.4 Modul konduktometru – návrh zapojení

Bylo navrženo zapojení pro měření vodivosti. Čidlo je zapojeno v obvodu zpětné vazby neinvertujícího zesilovače. Na vstup zesilovače je přivedeno střídavé napětí o amplitudě 100 mV o frekvenci 500 Hz a stejnosměrné složce 2,5 V. Jednotlivé rozsahy se přepínají pomocí analogového spínače ADG711. Na výstupu zesilovače je napětí, jehož velikost závisí na konduktivitě vzorku. Jako zdroj signálu je možno použít například oscilátor s Wienovým můstkem, nebo průběh generovat pomocí PWM přímo procesorem. Je však nutné zajistit konstantní amplitudu signálu.



Obr. 30 Konduktometr – přepínání rozsahů

Toto napětí je usměrněno v celovlnném usměrňovači, vyhlazeno a měřeno AD převodníkem. Zapojení usměrňovače vychází z [18].



*Obr. 31 Celovlnný usměrňovač*

Tento obvod nebyl realizován prakticky.

## 4. Software

Program pro mikroprocesor ARM je napsán v jazyce C ve vývojovém prostředí Atolic True Studio. Jedná se o prostředí postavené na IDE Eclipse v kombinaci s debuggerem GDB. Jako kompilátor je použitý standardní GCC pro architekturu ARM.

Pro ladění programu a programování je použito rozhraní ST-LINK. K počítači je připojeno pomocí části vývojové desky pro procesory STM32.

### 4.1 SW výbava

Byl napsán základní program, který periodicky vyčítá hodnoty z AD převodníku a průměruje je. Podle volby kanálu pak dojde k aplikaci kalibračních konstant. Ty jsou dvojí, uživatelské a hardwarové. Hardwarové konstanty se nastaví při oživení HW, jedná se o offsety a zesílení vstupních zesilovačů. Výstupní hodnota po korekci je v mV. Pro měření je možné využít přímo tuto hodnotu, nebo ji pomocí dalších konstant převést např. na hodnotu pH. Přepočet je pomocí lineární funkce, je tedy požadovaná směrnice a posunutí přímky. Z naměřených hodnot napětí pro pH sondu v sadě pufrů je možno určit lineární regresí požadované hodnoty a ty vložit do paměti v modulu. Výsledná hodnota je potom nejen v mV ale i přímo v pH. Všechny kalibrační konstanty jsou uloženy ve vyhrazené části programové paměti procesoru a je možné je podle potřeby měnit.

Program komunikuje s nadřazeným systémem (PC) pomocí sériové linky s úrovní 3 V. Parametry komunikace jsou 9600bd, 8N1. Ovládání je pomocí jednoduchého textového rozhraní.

### 4.2 Ovládání

Po připojení pomocí terminálového programu vypíše základní nabídku. Ovládání probíhá pomocí jednopísmenných zkratk. Nabídky jsou víceúrovňové, zpět je možné se dostat stiskem „0“.

Pro provoz je nejdůležitější nabídka „r“ a „R“, která načte z paměti hardwarové resp. uživatelské kalibrační konstanty. „v“ spustí periodický výpis naměřených hodnot po 500 ms. Během výpisu je možno změnit kanál volbou „1“ až „4“.

Kalibrace senzorů (uživatelské kalibrační konstanty) se provede pomocí „u“. Následně se zvolí příslušný kanál a po jeho zadání je možno nastavit offset „o“ nebo směrnici „s“. Použijeme hodnoty určené lineární regresí z naměřených hodnot. Po



nastavení vybrané konstanty se modul vrátí do základní nabídky. Po nastavení obou konstant pro vybraný kanál uložíme hodnoty volbou „W“ v základní nabídce.

#### 4.2.1 Příklad komunikace

Po resetu modulu se vypíše základní nabídka:

```
Adresa modulu 3, Aktivní kanál 2
Menu
v: periodicky vypis hodnot AD
e: opakovac
h: hardware test
k: kalibrace HW
r: read hw cal data
w: write hw cal data
R: read user cal data
W: write user cal data
u: kalibrace uzivatelska
q: reset
```

Po volbě „v“ dochází k periodickému vypisování naměřených hodnot.

```
Kanal 2, U:175.738510 mV pH:4.584245
```

Vypisované hodnoty je možné pomocí terminálového programu opatřit aktuálním časem přijetí a ukládat do souboru. Je možné další zpracování těchto dat, například do grafu.

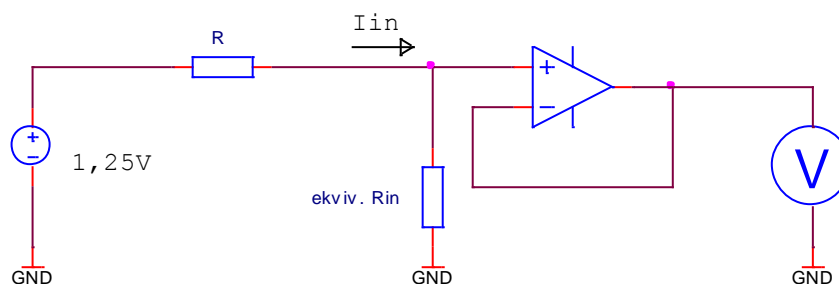
## 5. Realizace a ověření funkce

Bylo navrženo obvodové řešení pro měřicí modul pro měření napětí s velkým vstupním odporem (pro měření pH, ORP) a dále pro připojení Clarkova čidla (měření koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vodě). Oba moduly využívají stejnou procesorovou desku, kterou je případně možné použít i pro další moduly. Mechanicky se celek skládá ze dvou desek spojenými řadovým konektorem a mechanicky spojené pomocí distančních sloupků. Dále budou popsány vlastnosti a poznatky vycházející z ověření funkce obou modulů.

### 5.1 Modul pro měření napětí pro pH, ORP, ISE sondy

Po prvotním ověření funkčnosti byla provedena kalibrace offsetů. První kanál osazený zesilovačem OPA347 na DPS má offset  $-1,15\text{ mV}$ . Druhý kanál je osazen zesilovačem OPA2347, který je umístěn volně ve vzduchu. Přívod ze svorkovnice není zapájen do desky, ale vodičem připojen přímo na vstup zesilovače. Toto provedení bylo zvoleno pro srovnání s provedením, kdy je zesilovač na DPS. Zde je offset  $-2,93\text{ mV}$ . Třetí kanál je osazen OPA350 opět na DPS. Offset je  $-0,18\text{ mV}$ .

Nejdůležitější je vstupní odpor na svorkách pro připojení sondy. Bylo provedeno orientační měření pro jeho zjištění. Do série se stabilním zdrojem napětí (ADR441 s děličem 1:1)  $1,125\text{ V}$  byl zapojen rezistor  $R$  a na tento zdroj se známým vnitřním odporem byl připojen vstup měřicího modulu. Nejprve bylo měřeno napětí se zkratovaným odporem, poté byla propojka odstraněna. Z rozdílu napětí byl určen přibližný vstupní proud, vstupní odpor a chyba měření. Při měření prvního kanálu nebylo možné dospět k reprodukovatelným výsledkům, měření bylo provedeno po opětovném očištění a důkladném vysušení desky. První kanál i přesto dále vykazoval podstatně horší parametry, patrně vlivem nečistot na desce. Potvrdilo se, že provedení, kdy je celý zesilovač na DPS, je pro popsané účely použitelné. Vykazuje však značnou citlivost na nečistoty na desce a vlhkost vzduchu. Dále není možné zcela vyloučit vliv kondenzátoru na vstupu. Zvolené provedení WIMA FKP2 má minimální zaručenou hodnotu  $5 \times 10^{11}\ \Omega$ , průměrně se pohybuje kolem  $10^{12}\ \Omega$ .



Obr. 32: Určení vstupního odporu

Tab. 5: Vstupní parametry při  $R=1\text{G}\Omega$

Vstup	Napětí zdroje [mV]	Napětí měřené [mV]	Chyba [%]	$I_{in}$ [pA]	$R_{in}$ [M $\Omega$ ]
1: OPA347 DPS	1251,57	1246,2	0,43	5,37	232
	-1250,1	-1260	0,79	9,90	127
2: OPA2347 vzduch	1251,2	1249,5	0,14	1,70	735
	-1250	-1248,9	0,09	-1,10	1135
3: OPA350 DPS	1250,5	1248,9	0,13	1,60	780
	-1250	-1247,4	0,21	-2,60	479

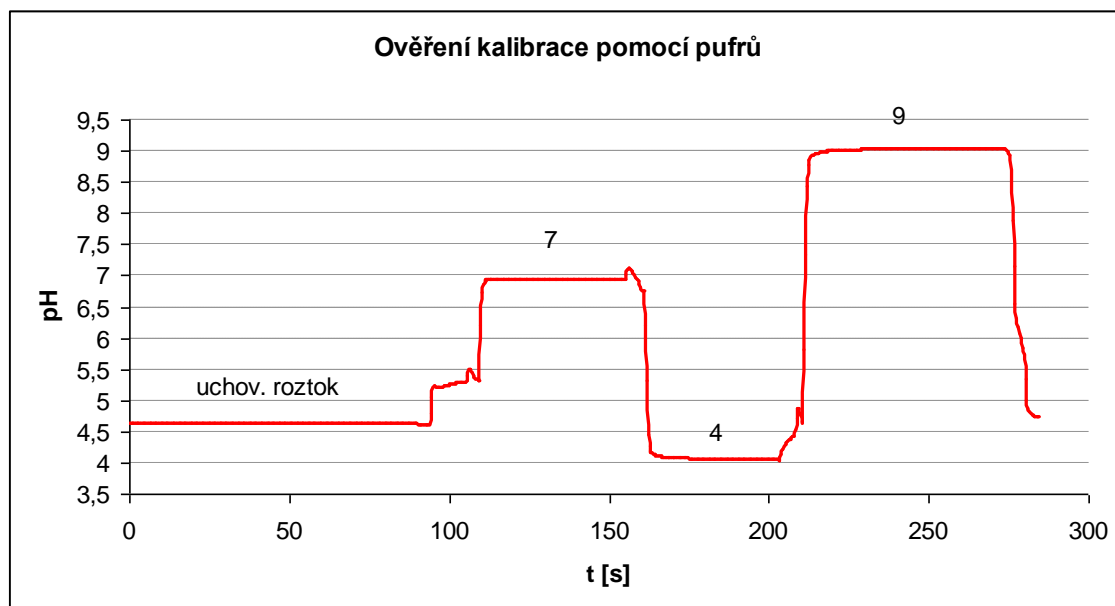
Pro přesnější určení vlivu jednotlivých dílů na vstupní odpor (zesilovač, kondenzátor, spoje na desce) by bylo nutné provést více podrobnějších srovnávacích měření. V běžných podmínkách je měření, kdy je v sérii se vstupem zapojen velký odpor velmi citlivé na vnější vlivy (přiblížení) a ustálení trvá řádově minuty. Odpor byl umístěn v trubici z izolantu, která byla opatřena zvenku stíněním. Stínění bylo připojeno na druhou vstupní svorku. Zdroj napětí byl plovoucí. Použití odporu o velikosti  $100\text{M}\Omega$  dle očekávání nevedlo k významné změně měřeného napětí, zařazený odpor  $10\text{G}\Omega$  již způsoboval horší reprodukovatelnost a vyšší citlivost na vnější vlivy. Použití odporu  $1\text{T}\Omega$  již vedlo k nereprodukovatelným výsledkům. Protože vstupní proud zesilovače je téměř konstantní, mění se vnitřní odpor zesilovače se vstupním napětím. Důležitější než přibližně určený vstupní odpor zesilovače je hodnota procentuální chyby měřeného napětí. Při sériovém odporu  $10\text{G}\Omega$  byla chyba u kanálu 2 do 1,5 %. U kanálu 3 byla do 2 % a nejhorší byl kanál 1: 9 %.

Orientačně byl také změřen vnitřní odpor jednotlivých elektrod. Měření bylo provedeno na kanálu 2, elektroda byla paralelně zatížena  $1\text{G}\Omega$  a z poklesu napětí byl určen vnitřní odpor.

Plastová pH elektroda typ pH61 (Elektrochemické detektory Turnov) má vnitřní odpor cca. 480 M $\Omega$ , celoskleněné provedení pH91P od téhož výrobce má 630 M $\Omega$ . Vnitřní odpor ORP elektrody Pt621P je malý (referentní elektroda a Pt plech), bylo nutno snížit zatěžovací odpor na 10 M $\Omega$ . Vnitřní odpor je zhruba 2 M $\Omega$ . Uvedené hodnoty jsou pouze přibližné, ale souhlasí s údajem výrobce (řádově stovky M $\Omega$  pro pH elektrody). Zatížení elektrody mohlo mít vliv na její elektrochemické napětí a tedy mohlo značně ovlivnit měření.

Ukázalo se, že navržený zesilovač je pro měření pH i ORP za laboratorních podmínek vhodný, chyba měření při teoretickém vnitřním odporu elektrody 1 G $\Omega$  byla do 0,2%. Hodnotu pH je s danými elektrodami možné měřit v rozlišení 0,02 pH, reprodukovatelnost měření po kalibraci je 0,05 pH. Měření těchto veličin je citlivé na proudění kapaliny, při zamíchání roztoku dochází ke změně hodnoty.

Byla provedena kalibrace pomocí pufrů o hodnotě pH 4; 7 a 9. Opakované měření po 24 hodinách a 7 dnech ukázalo, že reprodukovatelnost výsledků je dobrá (největší odchylka do 0,1 pH po týdnu), závisující jen na parametrech sondy. Odezva je velmi rychlá, ustálení hodnoty je do 20 sekund. Mimo měření jsou elektrody uloženy v uchovávacím roztoku. Pro kalibraci ORP byly použity roztoky o hodnotě 457 a 675 mV oproti standardní vodíkové elektrodě. Zde byla reprodukovatelnost  $\pm 10$  mV.



Obr. 33 Ověření plastové pH sondy po 7 dnech od kalibrace

Jednotlivé charakteristiky čidel zjištěné při kalibraci jsou v příloze.

## Spotřeba energie

Měřicí modul nebyl osazen izolačním měničem pro napájení z 12 V, místo toho bylo pro napájení analogové části použito zdroje 5 V. Procesor a související obvody byly napájeny 3,3 V.

Byla měřena spotřeba při následujících stavech:

Tab. 6: Spotřeba modulu milivoltmetru

Stav	Napětí [V]	Spotřeba [mA]	Příkon [mW]
Měření zapnuto	5 (analog)	9,5 (z toho ADUM 1,45)	47,5 (z toho ADUM 7,25)
	3,4	5,2	17,7 (celkový modulu 62,5)
Měření vypnuto, CPU aktivní, komunikace po UART1	3,4	4,5	15,3
Měření vypnuto, CPU režim spánku	3,4	0,06	0,2

Pozn.: Komunikace po RS485 nebyla aktivní, ovládání probíhalo sériovou linkou na USART2.

## 5.2 Modul pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku

Tento modul je určen pro připojení čidla KCPS 29. Minimální rychlost proudění kapaliny kolem membrány tohoto čidla je 0,1 cm/s a signál ve vodě nasycené vzduchem je 25 nA. Bylo nutno mírně upravit hodnoty děličů pro dosažení správného polarizačního napětí. Při měření je to 646 mV, při vypnutém napájení 640 mV. Nevýhodou zapojení převodníku I/U se dvěma zesilovači je násobení chyb offsetu druhým zesilovačem. Byla provedena kalibrace pomocí sady odporů, které byly zapojeny místo čidla. Napětí na nich je konstantní, je tak snadno možné určit proud. Lineární regresí byly určeny kalibrační konstanty. Při nulovém proudu je výstupní napětí z převodníku 2,5 mV.

Kyslíkové čidlo má klidový proud ve vodě bez kyslíku 2 nA, ve vzduchu nasyceném vodní parou potom 22 nA. Závislost proudu na koncentraci kyslíku se v čase poněkud měnila vlivem stárnutí.

Obvod barometrického čidla funguje v můstkovém zapojení, eliminují se tak chyby vnesené změnou napájecího napětí i případný offset převodníku. Byla ověřena funkce porovnáním naměřeného průběhu s aktuálním průběhem tlaku vzduchu, který se lišil pouze o posun hodnoty, který byl konstantní.

V úsporném režimu je odběr z 12 V větve ústředny nulový a digitální obvody odebírají 60  $\mu$ A ze zdroje 3,3 V. Při měření je spotřeba relativně vysoká, daná hlavně

špatnou účinností izolačního měniče (mezi 21 % až 26 %). Naměřené hodnoty jsou shrnuty v následujících tabulkách. Značnou část spotřeby analogové větve způsobuje nízkošumová reference ADR441 s vlastním odběrem 3 mA.

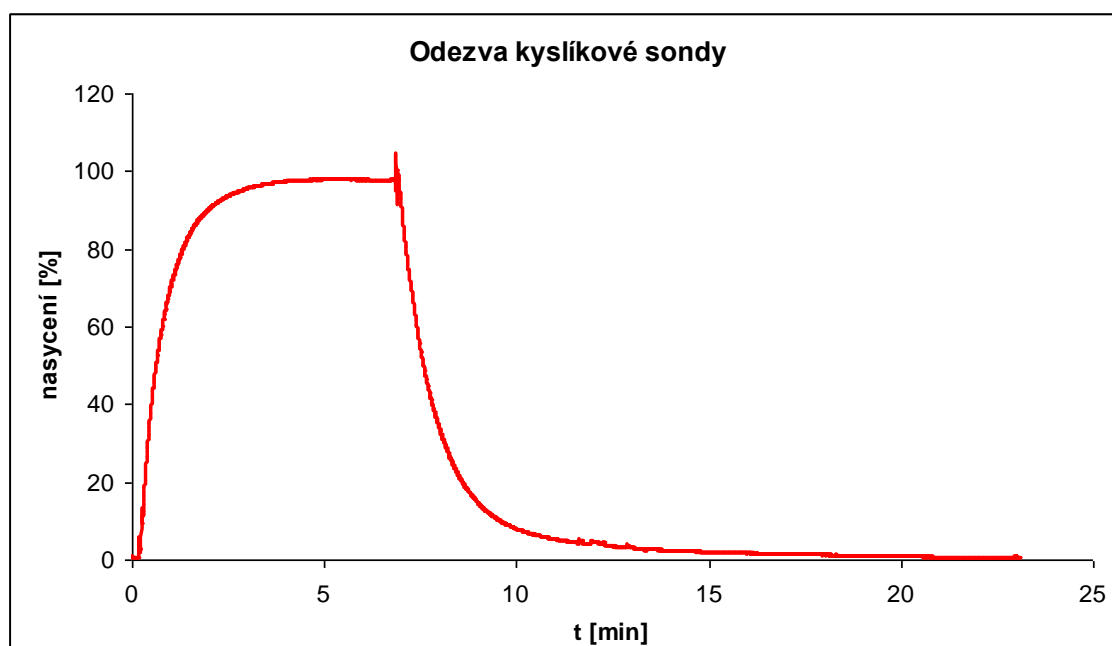
Tab. 7: Měření koncentrace kyslíku nebo teploty

	Napětí [V]	Spotřeba [mA]	Příkon [mW]
Analogová část	5 (za měničem)	9,5 (z toho ADUM 1,5)	47,5 (z toho ADUM 7,5)
	12 (z ústředny)	18,6	223,2
Digitální část	3,3	5	16,5
Celkový odběr	3,3 a 12	-	240

Tab. 8: Měření atmosférického tlaku

	Napětí [V]	Spotřeba [mA]	Příkon [mW]
Analogová část	5 (za měničem)	14,3 (z toho ADUM 1,5)	71,5 (z toho ADUM 7,5)
	12 (z ústředny)	23,4	280,8
Digitální část	3,3	5	16,5
Celkový odběr	3,3 a 12	-	352,3

Odezva na skokovou změnu koncentrace kyslíku ukazuje následující graf. Nejprve bylo čidlo ponecháno ve vodě s přísadou siřičitanu (k odstranění kyslíku), poté bylo vloženo do uzavřené nádoby nad hladinu vody. Umístěním do vzduchu nasyceného vodní parou je možno nahradit vodu syčenou vzduchem. Po ustálení bylo čidlo opět umístěno do vody bez kyslíku. Je vidět, že odezva na nárůst koncentrace je rychlejší než na pokles.



Obr. 34 Odezva kyslíkové sondy

## Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a ověřit měřicí moduly pro geologickou ústřednu určené pro použití s různými elektrochemickými senzory. Vlastní měřicí modul byl rozdělen na dvě části. Procesorová část zajišťuje komunikaci s ústřednou po sběrnici RS485 a dále zajišťuje galvanické oddělení signálů a napájení pro analogovou část modulu. Základní deska měřicího modulu je o rozměrech 100 x 38 mm, což je jednotná velikost pro všechny moduly v měřicí ústředně. Nad touto deskou je umístěn analogový vstupní modul. Modul milivoltmetru s velkým vstupním odporem je určen pro připojení nejvýše tří senzorů pro měření pH, ORP nebo iontově selektivních elektrod. Modul dále umožňuje měřit teplotu, přičemž v jednom okamžiku je možno měřit pouze jednu veličinu.

Toto uspořádání snižuje složitost elektroniky a dané omezení pro účely měření parametrů podzemních vod nevadí. Při konstrukci byla použita technika aktivního stínění pro vstupní obvody. Ukázalo se, že za použití této techniky je možné pro konstrukci použít běžné cenově výhodné materiály plošného spoje, dosažený vstupní odpor je dostatečný pro použití s běžnými pH a ORP sondami. Funkce byla ověřena opakovaným měřením v standardních kalibračních roztocích.

Modul pro měření koncentrace rozpuštěného kyslíku slouží pro připojení Clarkova čidla, které vyžaduje trvalé přivedení polarizačního napětí. Z důvodů snížení spotřeby energie v době mimo měření je čidlo napájeno z baterie. Tím je snížena doba ustálení z několika desítek minut na řádově minuty. Zvolené čidlo nevyžaduje příliš velké rychlosti proudění měřené kapaliny, což je výhodné. Velikost této hodnoty je dána konstrukcí - zmenšením plochy aktivní elektrody čidla. Výsledný proud obvodem je pak velmi malý v řádu nejvýše desítek nA pro vodu plně nasycenou vzduchem. Funkce navrženého nanoampérmetru byla ověřena pomocí odporů simulujících čidlo i přímo měřením s danou sondou. Obvod je možno jednoduchou změnou odporů přizpůsobit i k použití s čidly jiných výrobců, které mají odlišné parametry.

Pro oba měřicí moduly byl navržen základní software, který umožnil ověření funkce. Slouží ke komunikaci s nadřazeným systémem (výpis aktuálně měřených hodnot) a umožňuje kompenzaci pevných offsetů a chyb zesílení pomocí kalibračních konstant. Dále umožňuje základní přepočty na měřenou veličinu, opět pomocí kalibračních

konstant pro každé čidlo. Jsou implementovány i funkce pro přímé ovládání napájecích obvodů – vypínání napětí pro čidla, úsporný režim.

Další vývoj by bylo vhodné směřovat k dalšímu snížení spotřeby během měření. Je možné zvolit referenci s nižší spotřebou, snížit proud teplotním čidlem. Běžně dostupné izolační měniče mají pro malé zatížení obecně špatnou účinnost, vlastní vývoj by mohl přinést další zlepšení. V případě realizace vysokoimpedančních zesilovačů na DPS by bylo vhodné provést detailní měření k určení vstupního odporu, vlivu jednotlivých komponent a uspořádání spojů. Po optimalizaci a vhodné povrchové úpravě desky ke zlepšení izolačních vlastností, je navržené řešení s běžným materiálem desky cenově velmi výhodné. Obslužný program je možno rozšířit ve směru podporovaných komunikačních protokolů, archivace dat nebo automatické detekce kalibračních roztoků.



## Seznam použité literatury

- [1] VINŠOVÁ, Hana, ZACHAŘ, Pavel, ZÁRUBA, Kamil. *Potenciometrické měření pH* [online]. 2007 [cit. 2013-03-01].  
URL: <[http://www.vscht.cz/anl/lach1/3\\_Pot-pH.pdf](http://www.vscht.cz/anl/lach1/3_Pot-pH.pdf)>.
- [2] SANDER, Rolf. *Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry*. [online]. 1999 [cit. 2013-03-01]. URL: <<http://www.henrys-law.org/henry.pdf>>
- [3] NOVÁK, Josef. *Fyzikální chemie: bakalářský a magisterský kurz*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2008, 260 s. ISBN 978-80-7080-675-3.
- [4] MCMILLAN Greg, GRAY Jim. *The Essentials of pH Measurement Design, Installation, Maintenance, and Improvement*. [online]. 2009 [cit. 2013-03-09].  
URL: <<http://www.modelingandcontrol.com/repository/ISA55thIISPaperIIS09-P054.pdf>>
- [5] EMERSON PROCESS MANAGEMENT. *Fundamentals of ORP measurement*. [online]. 2008 [cit. 2013-03-10].  
URL: <[http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/Liq\\_ADS\\_43-014.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/Liq_ADS_43-014.pdf)>.
- [6] EMERSON PROCESS MANAGEMENT. *Theory and Practice of pH Measurement*. [online]. 2010 [cit. 2013-03-10].  
URL: <[http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/Liq\\_ADS\\_44-6033.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/Liq_ADS_44-6033.pdf)>.
- [7] KRONĎÁK, Martin. *Clarkovo čidlo*. Automatizace. 2007, roč. 50, 7-8, str. 502-504
- [8] YSI Incorporated *The Dissolved Oxygen Handbook*. [online]. 2009 [cit. 2013-03-10]. URL: <<http://blog.ysi.com/definitive-dissolved-oxygen-handbook>>
- [9] ČSN EN ISO 5814. *Kvalita vod – Stanovení rozpuštěného kyslíku – Elektrochemická metoda s membránovou sondou*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví Praha, 2013. 24 stran.
- [10] ĎAĎO Stanislav, KREIDL Marcel. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 315 s.
- [11] GREISINGER. *Manuály k přístrojům Greisinger*
- [12] GRYF. *Manuály k přístrojům Gryf*

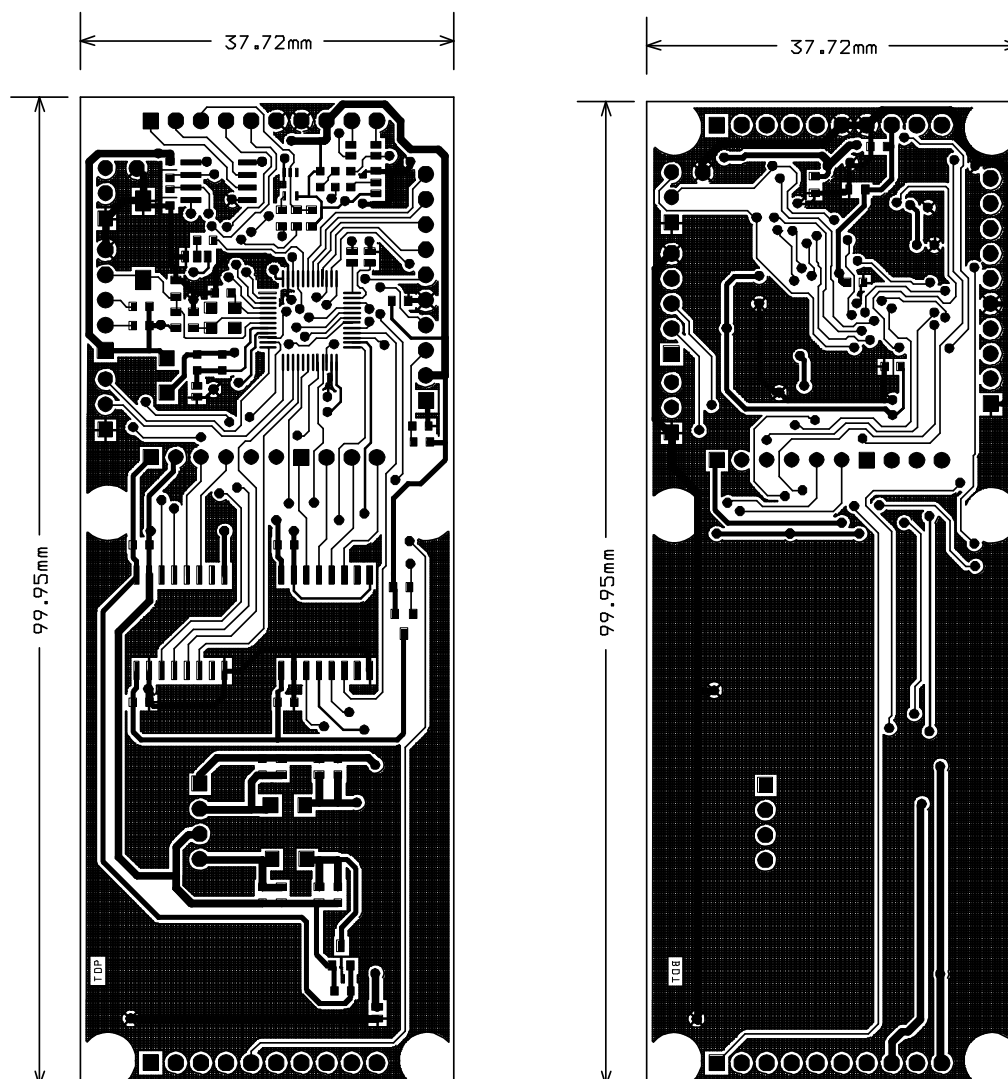
- [13] WTW. *Manuály k přístrojům WTW*.
- [14] VYTRÁS, Karel. *Kapitoly ze současné potenciometrie*. Vyd. 2. Praha: ALIT, 1997, 74 s.
- [15] ČSN 75 7367. *Jakost vod – stanovení oxidačně-redukčního potenciálu (ORP)*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví Praha, 2011. 12 stran.
- [16] IPC. *IPC Test Manual 650 Volume and Surface Resistivity of Dielectric Materials* [online]. 1994 [cit. 2013-03-10]. URL: <[www.ipc.org/TM/2-6-3-7.pdf](http://www.ipc.org/TM/2-6-3-7.pdf)>
- [17] Texas Instruments, Analog Devices, STM. *Katalogové listy použitých obvodů*.
- [18] Texas Instruments. *Precision absolute value circuits* [online]. 1997 [cit. 2013-03-10]. URL: <<http://www.ti.com/lit/an/sboa068/sboa068.pdf>>

## Obsah přiloženého CD

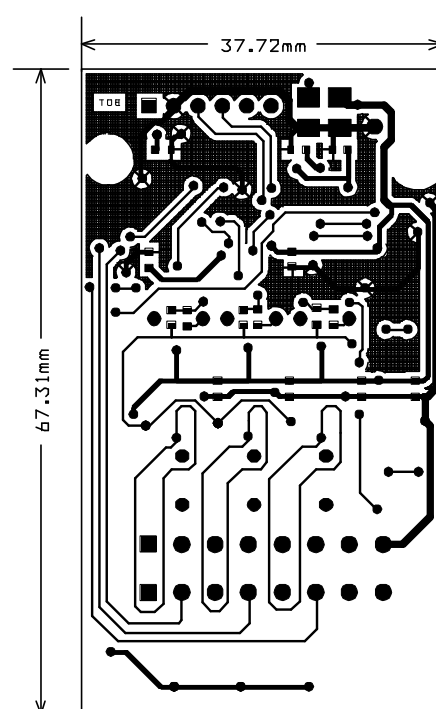
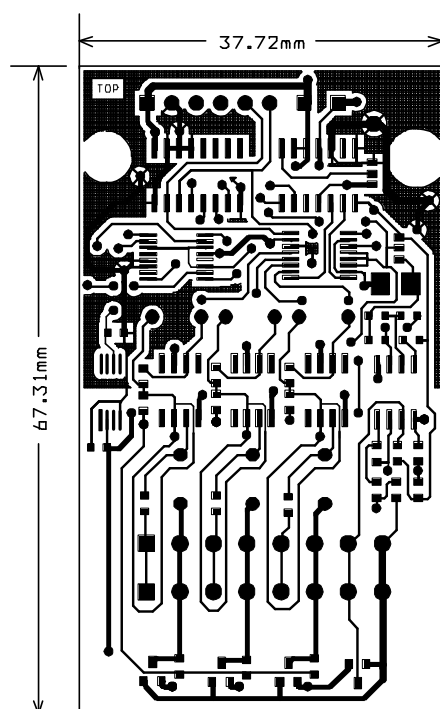
- Diplomová práce ve formátu PDF
- Katalogové listy použitých obvodů
- Zdrojové kódy obslužného SW
- Výrobní dokumentace
  - Schémata a výkresy desek s plošnými spoji
  - Výrobní data pro DPS ve formátu Gerber
  - Seznamy součástek

## Příloha A – Motivy desek s plošnými spoji

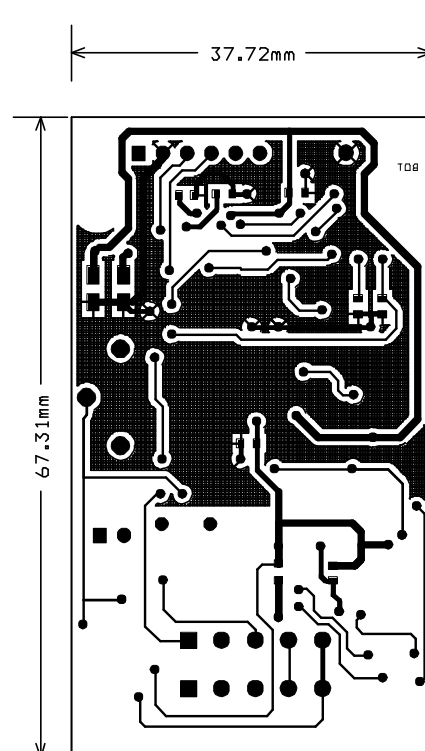
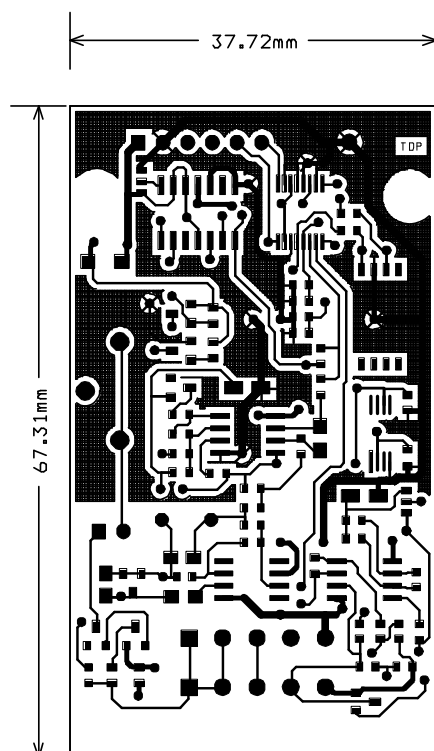
### Procesorová deska (horní a dolní strana)



## Modul milivoltmetru

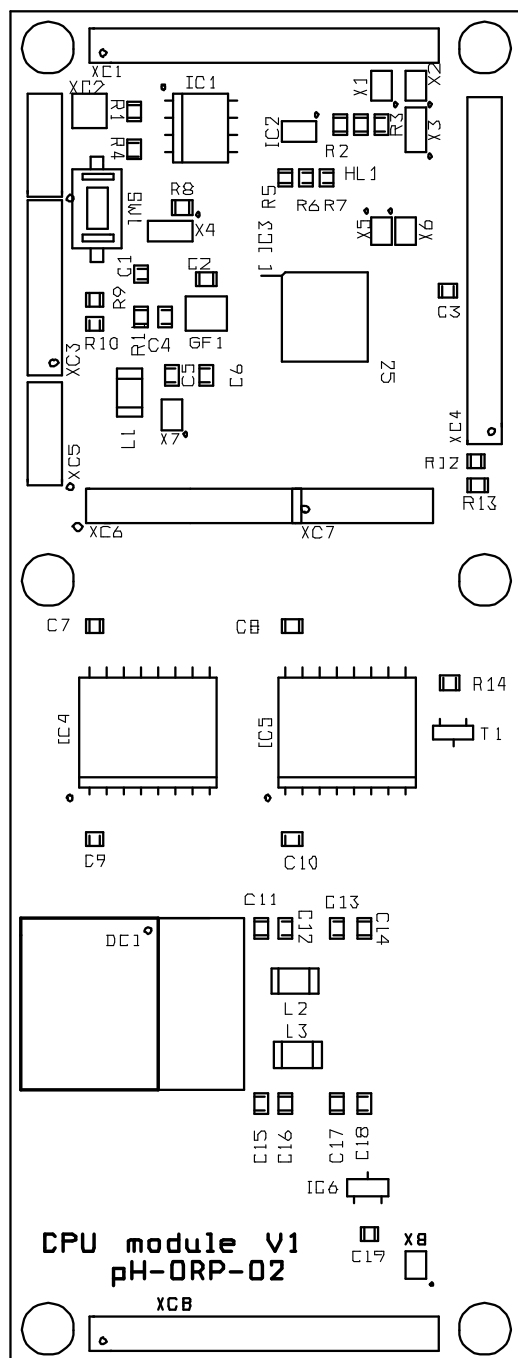


## Modul pro měření koncentrace kyslíku

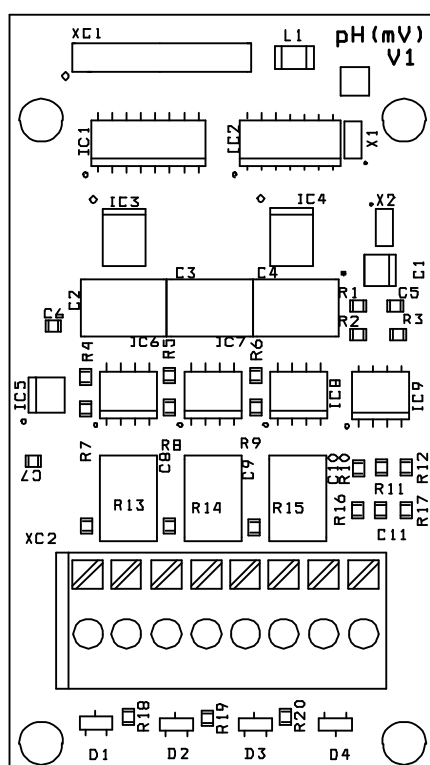


## Příloha B – Osazovací plánky

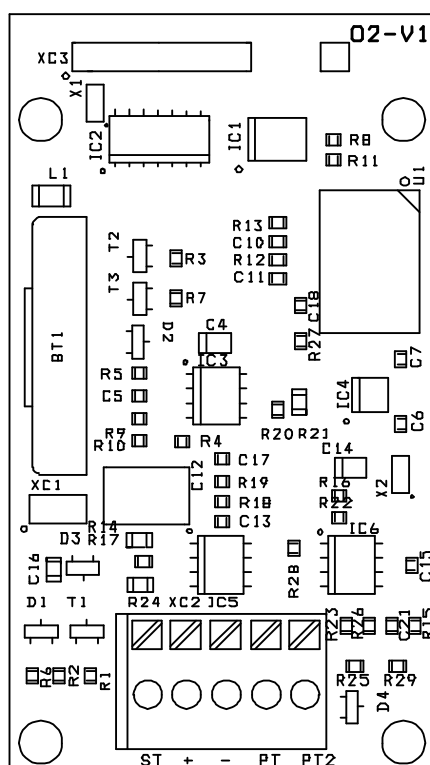
### Procesorová deska



## Modul milivoltmetru



## Modul pro měření koncentrace kyslíku



## Příloha C – Fotografie

Procesorová deska, modul měření koncentrace rozp. kyslíku, sonda





**Sestava: procesorová deska a modul milivoltmetru**



**Sondy: ORP, pH skleněná s teplotním čidlem, pH plastová**



## Příloha D – Kalibrační charakteristiky čidel

